

RAPORTY IChTJ. SERIA B nr 2/2020

**WYTYCZNE
DO BUDOWY RADIACYJNEJ INSTALACJI
OBRÓBKI WÓD BALASTOWYCH
PRZY UŻYCIU WIĄZKI ELEKTRONÓW**

Zbigniew Zimek

Warszawa 2020

AUTOR

dr inż. Zbigniew Zimek

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych

WYDAWCA

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa

tel. 22 811 06 56, fax: 22 811 15 32, e-mail: sekdyrn@ichtj.waw.pl

www.ichtj.waw.pl

Raport został wydany w postaci otrzymanej od Autora

Wytyczne do budowy radiacyjnej instalacji obróbki wód balastowych przy użyciu wiązki elektronów

Termin „wody balastowe” odnosi się do wody wraz z zawieszoną pobranej przez statek w celu kontroli parametrów jego pływalności, takich jak przegłębienie, przechył, zanurzenie, stateczność czy naprężenia. Jak już wcześniej ustalono, wody balastowe pobrane na początku podróży statku zawierają różne morskie organizmy, takie jak plankton, bakterie czy skorupiaki, w tym szkodliwe organizmy wodne i patogeny. Obecne prawo międzynarodowe reguluje postępowanie z wodami balastowymi, które polega na ich utylizacji z zastosowaniem metod mechanicznych, fizycznych, chemicznych i biologicznych, pojedynczo bądź w kombinacjach, w celu usunięcia, unieszkodliwienia lub uniknięcia poboru bądź zrzutu szkodliwych organizmów wodnych i patogenów zawartych w wodach balastowych i osadach. Jeszcze jedną perspektywiczną metodą odkażania wód balastowych może być metoda z wykorzystaniem promieniowania jonizującego, a szczególnie wiązki przyspieszonych elektronów. Badania utylizacji ścieków i osadów komunalnych mają swoje źródło w prowadzonych od początku lat siedemdziesiątych szeroko zakrojonych pracach dotyczących dezynfekcji z użyciem wiązki elektronów, które potwierdziły skuteczność metody radiacyjnej.

W raporcie przedstawiono założenia do budowy modułu higienizacji radiacyjnej wód balastowych które obejmują: przegląd dotychczasowych doświadczeń w zastosowaniu techniki radiacyjnej do higienizacji ścieków, opis procesu technologicznego obróbki radiacyjnej wód balastowych, określenie wydajności procesu radiacyjnej obróbki wód balastowych, dyskusję na temat wyboru akceleratora i technologii napromieniania osadów, ustalenie wytycznych do budowy instalacji akceleratora i osłon biologicznych oraz omówienie zagadnień ochrony radiologicznej. Zaprezentowano też kluczowe elementy urządzeń instalacji radiacyjnej przeznaczonej do prowadzenia obróbki radiacyjnej wód balastowych oraz wyspecyfikowano istotne elementy akceleratora.

Przeprowadzona ocena wydajności metody radiacyjnej w zastosowaniu do procesu higienizacji wód balastowych wykazała, że oprócz eliminacji uciążliwych zagrożeń ekologicznych możliwe jest osiągnięcie dużej wydajności instalacji. Do wad metody radiacyjnej należą: stosunkowo wysokie koszty inwestycyjne i dodatkowe wymagania dotyczące kwalifikacji obsługi. Jednak ze względu na wzrost wymagań w zakresie ochrony środowiska metoda radiacyjna może okazać się konkurencyjna w stosunku do innych obecnie stosowanych rozwiązań.

Guidelines for the construction of radiation installation for ballast water treatment using electron beam

The term ‘ballast water’ refers to the water together with the suspension taken up by the ship to control buoyancy parameters such as trim, heel, draft, stability or stress of the ship. As established in the past, ballast water collected at the beginning of a ship's journey contains various marine organisms such as plankton, bacteria or crustaceans including harmful aquatic organisms and pathogens. Currently existing international law regulates the handling of ballast water through its utilization using mechanical, physical, chemical and biological methods individually or in combination to remove, neutralize or avoid the collection or discharge of harmful aquatic organisms and pathogens in contained ballast water and sediments. The use of ionizing radiation, and especially the beam of accelerated electrons, can be considered as another perspective method for ballast water decontamination. Research on the utilization of sewage and municipal sewage sludge have their source in extensive work on disinfection using an electron beam, conducted since the beginning of the 1970s, which confirmed the effectiveness of the radiation method.

The report presents guidelines for the construction of a radiation ballast module for ballast water, which includes: review of previous experience in the use of radiation technique for wastewater decontamination, a description of the technological process of radiation treatment of ballast water, determination of the process efficiency of ballast water radiation treatment, discussion on the choice of accelerator and technology of sludge irradiation, definition of

guidelines for the accelerator and biological shields installation, and discussion of radiation protection issues. The report presents key elements of radiation system devices intended for ballast water radiation treatment and important accelerator elements were specified.

The assessment of the efficiency of the radiation method applied to the ballast water decontamination process has shown that in addition to eliminating arduous ecological hazards, it is possible to achieve high installation efficiency. The disadvantages of the radiation method are relatively high investment costs and special requirements for service qualifications. However, due to the increasing requirements in the field of environmental protection, the radiation method may prove competitive compared to other currently used solutions.

SPIS TREŚCI

1. DANE OGÓLNE	7
2. RADIACYJNA OBRÓBKA MATERIAŁÓW W FAZIE CIEKLEJ	7
2.1. Wody balastowe	7
2.2. Przegląd dotychczasowych doświadczeń w zastosowaniu techniki radiacyjnej do higienizacji ścieków	8
2.3. Instalacja laboratoryjna przeznaczona do ciągłej obróbki ścieków zbudowana w IChTJ	12
2.4. Aspekty ekonomiczne technologii radiacyjnych	16
3. WYBÓR AKCELERATORA DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ WODY BALASTOWEJ	17
3.1. Informacje ogólne	17
3.2. Dostawcy akceleratorów	18
4. PARAMETRY TECHNICZNE AKCELERATORA ELV-4	20
4.1. Podstawowy zestaw dostawy	21
4.2. Zestaw części zamiennych na 2 lata eksploatacji	21
4.3. Wymagania dotyczące pomieszczeń i lokalizacji sprzętu	21
4.4. Zasilanie	21
4.5. Woda chłodząca	22
4.6. Wymagania dotyczące urządzeń dźwigowych	22
4.7. Zobowiązania dostawcy	22
4.8. Zobowiązania użytkownika	22
4.9. Zasada działania akceleratora typu ELV	23
5. PROCES OBRÓBKI RADIACYJNEJ	26
5.1. Obróbka radiacyjna wód balastowych	26
5.2. Wydajność instalacji	27
5.3. Koncepcja węzła obróbki radiacyjnej wód balastowych	27
5.4. Opis wybranych elementów obiektu	28
6. WYMAGANIA DOTYCZĄCE INSTALACJI WYPOSAŻONEJ W AKCELERATOR	31
6.1. Osłony przed promieniowaniem jonizującym	31
6.2. Ochrona radiologiczna	35
6.3. Wentylacja i warunki klimatyczne	37
6.4. Wytyczne do instrukcji BHP	39
6.5. Wytyczne do ochrony przeciwkorozyjnej	40
6.6. Zatrudnienie oraz zagadnienia socjalne i sanitarne	41
6.7. Instalacje pomocnicze	41
7. PODSUMOWANIE	42
8. LITERATURA	43

1. DANE OGÓLNE

W raporcie przedstawiono wytyczne do budowy instalacji przeznaczonej do radiacyjnej obróbki wód balastowych i przewidzianej do zainstalowania w suchym doku.

Opracowano je w ramach realizacji projektu nr POIR.01.02.00-00 – 0007/18 pt. „Zaprojektowanie i weryfikacja w skali pilotażowej przyjaznego dla środowiska, zintegrowanego z dokiem pływającym, systemu odbioru i oczyszczania wód balastowych i szlamów ze statku oraz wód technologicznych z procesu czyszczenia kadłuba statku, wykorzystującego do utylizacji zanieczyszczeń promieniowanie jonizujące”. Projekt ten został złożony na konkurs Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) nr 1/1.2/2018/POIR i uzyskał finansowanie z NCBR – Program Sektorowy INNOSHIP oraz z Unii Europejskiej ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego – Program Operacyjny Inteligentny Rozwój 2014-2020.

Zakres prac badawczo-rozwojowych został określony w umowie nr U-NI/K/W11/75/D-22959/000/2019 z dnia 05.09.2019 r. (załącznik nr 4).

Wytyczne do budowy modułu higienizacji radiacyjnej wód balastowych obejmują:

- przegląd dotychczasowych doświadczeń w zastosowaniu techniki radiacyjnej do higienizacji ścieków;
- opis procesu technologicznego obróbki radiacyjnej wód balastowych;
- określenie wydajności procesu obróbki radiacyjnej wód balastowych;
- wybór akceleratora i technologii napromieniania osadów;
- wytyczne dla instalacji akceleratora i osłon biologicznych oraz omówienie zagadnień ochrony radiologicznej.

W raporcie przedstawiono kluczowe elementy urządzeń instalacji przeznaczonej do prowadzenia obróbki radiacyjnej wód balastowych oraz istotne elementy akceleratora, urządzeń i instalacji pomocniczych, a także elementy związane z procesem technologicznym.

Instalacja ma mieć wydajność zgodną z zapotrzebowaniem doku – 120 ton na dobę.

Podstawowe parametry akceleratora, czyli energia elektronów i moc wiązki, powinny wynosić odpowiednio 1 MeV i 50 kW.

Wymiary proponowanego pomieszczenia nr 6 w suchym doku przewidzianego do instalacji akceleratora powinny być następujące: szerokość – 3,9 m, długość – 20 m, wysokość – 4,35 m.

Należy uwzględnić, że wewnątrz pomieszczenia są usztywnienia baszt oraz pokładu górnego doku, które ograniczają kubaturę pomieszczenia.

2. RADIACYJNA OBRÓBKA MATERIAŁÓW W FAZIE CIEKŁEJ

2.1. Wody balastowe

Termin „wody balastowe” odnosi się do wody wraz z zawiesiną pobranej przez statek w celu kontroli parametrów jego pływalności, takich jak przegłębienie, przechył, zanurzenie, stateczność czy naprężenia. Zwykle wodą balastową jest woda morska pobierana w porcie na początku podróży i rozładowywana w porcie docelowym. Jak już wcześniej ustalono, wody balastowe pobrane na początku podróży statku zawierają różne morskie organizmy, takie jak plankton, bakterie czy skorupiaki. Szkodliwe organizmy wodne i patogeny są wprowadzane do morza m.in. przez ujścia rzek lub cieków wody słodkiej. Mogą one stwarzać zagrożenie dla środowiska, zdrowia ludzkiego, mienia lub zasobów oraz niekorzystnie wpływać na różnorodność biologiczną, a także utrudniać inne zgodne z prawem sposoby wykorzystywania morza.

Warto podkreślić, że po morzach i oceanach świata pływa ok. 100 tys. statków przewożących co roku ok. 10 mld ton wód balastowych, a w wodach tych mogą znajdować się wirusy,

bakterie (m.in. chorobotwórcze sinice, powodujące zakwity wód), plankton, grzybnie, rośliny i zwierzęta wodne. Obecne prawo międzynarodowe reguluje postępowanie z wodami balastowymi, które polega na zastosowaniu procesów mechanicznych, fizycznych, chemicznych i biologicznych, pojedynczo bądź w kombinacjach, w celu usunięcia, unieszkodliwienia lub uniknięcia poboru bądź zrzutu szkodliwych organizmów wodnych i patogenów zawartych w wodach balastowych i osadach [1].

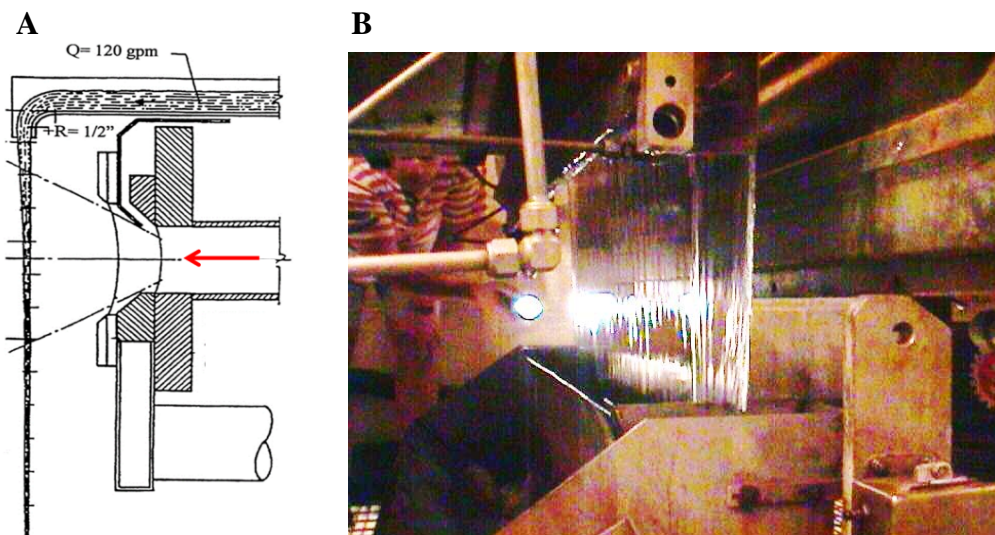
Systemy oczyszczające wody balastowe opierają się na różnych zasadach i sposobach działania. Są to: dezynfekcja preparatami chemicznymi ulegającymi biodegradacji, ozonowanie, usuwanie tlenu, filtrowanie, napromienianie UV (promieniowanie ultrafioletowe, uszkadzające genetycznie mikroorganizmy i zapobiegające ich reprodukcji), generowanie ultradźwięków (drgań o wysokiej częstotliwości powodujących destrukcję mikrobów), ogrzewanie wód balastowych do temperatury 45°C oraz pompowanie wód pod wysokim ciśnieniem i gwałtowne ich rozprężanie. Niektóre systemy stanowią kombinację różnych sposobów neutralizacji wód balastowych, jak napromienianie UV i ozonowanie czy filtrowanie i sterylizacja.

2.2. Przegląd dotychczasowych doświadczeń w zastosowaniu techniki radiacyjnej do higienizacji ścieków

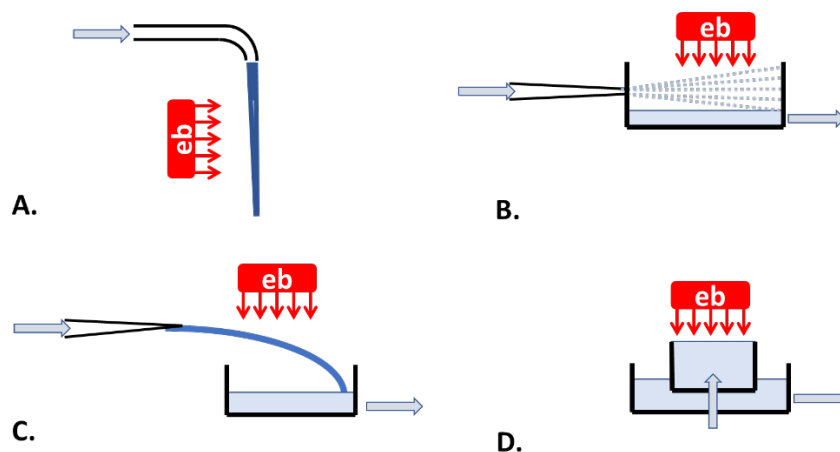
Jeszcze jedną istotną metodą odkażania wód balastowych może być metoda z wykorzystaniem promieniowania jonizującego, a szczególnie wiązki przyspieszonych elektronów. Od kilkudziesięciu lat jest ona z powodzeniem stosowana w badaniach nad uzdatnianiem ścieków komunalnych i przemysłowych. Badania te rozpoczęto i prowadzono w kilku krajach (USA, Japonia, Rosja, Niemcy) już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku.

Badania utylizacji ścieków komunalnych w USA mają swoje źródło w szeroko zakrojonych pracach dotyczących dezynfekcji ścieków przeprowadzonych przez Massachusetts Institute of Technology (MIT) i High Voltage Engineering Corporation przy wykorzystaniu wiązki elektronów na początku lat siedemdziesiątych [2]. Uzyskane pozytywne wyniki dezynfekcji doprowadziły do powstania dużego zakładu w Deer Island Treatment Plant w Bostonie w stanie Massachusetts, który zaczął działać w 1976 r. i w którym wykorzystano akcelerator elektronów typu ICT o energii elektronów 800 keV i mocy wiązki 50 kW. Na podstawie wyników dezynfekcji uzyskanych w Deer Island Treatment Plant, w 1977 r. Miami-Dade Water and Sewer Authority podjęło decyzję w sprawie budowy systemu napromieniania ścieków wiązką elektronów, który stanowiłby element centralnej oczyszczalni ścieków. Zamiast pierwotnie planowanego procesu obróbki cieplnej do dezynfekcji osadu miała być stosowana wiązka elektronów (1,5 MeV, 75 kW). Projekt zatwierdzono w kwietniu 1978 r. i otrzymano na jego realizację dotacje amerykańskiej EPA. System został zbudowany i zaczął funkcjonować we wrześniu 1984 r., jednak z powodu zmiany lokalnych przepisów dotyczących usuwania osadów nie był już potrzebny w oczyszczalni. System działał z przerwami do grudnia 1985 r. Należy zauważyć, że skutecznie dezynfekował ścieki przy prędkości przepływu 120 gpm i użyciu minimalnej dawki promieniowania wynoszącej 4 kGy.

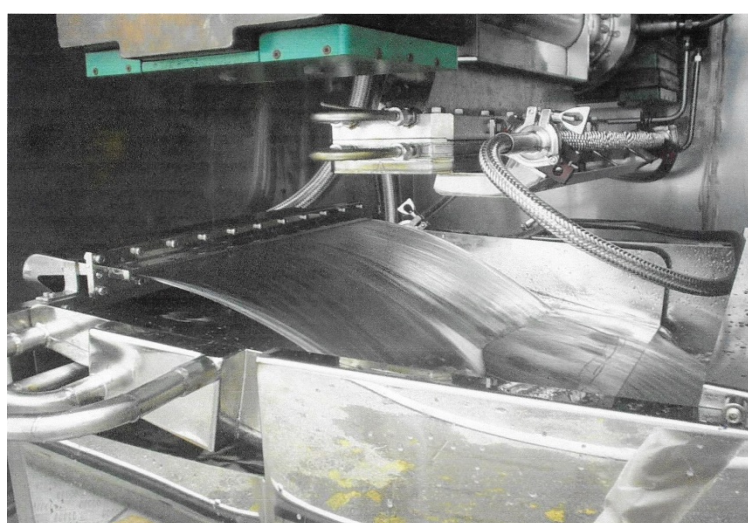
Kluczowym zagadnieniem dla każdej instalacji radiacyjnej jest wybór geometrii procesu oddziaływania wiązki elektronów na obiekt poddawany obróbce radiacyjnej. Rozwiązanie zaprezentowane na rys. 1 zastosowano w opisanej wyżej instalacji w USA. Geometria strefy napromieniania wpływa bezpośrednio na współczynnik wykorzystania wiązki elektronów, a tym samym na wydajność instalacji. Jest to szczególnie ważne w przypadku stosowania stosunkowo niskich energii przyspieszonych elektronów w procesie uzdatniania ścieków (0,6-1,5 MeV). Akceleratory niskoenergetyczne charakteryzują się mniejszymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi w porównaniu do akceleratorów przyspieszających elektrony w zakresie 5-10 MeV. Warto zaznaczyć, że prowadzone w różnych krajach prace związane z wdrożeniem instalacji do uzdatniania ścieków doprowadziły do opracowania różnorodnych geometrii strefy napromieniania dopasowujących gęstość strumienia ścieków do energii przyspieszonych elektronów danej instalacji, co schematycznie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Geometria obróbki radiacyjnej ścieków komunalnych z poziomym wyprowadzeniem wiązki elektronów: A – przekrój poprzeczny układu wyprowadzenia wiązki z akceleratora, B – widok ogólny układu wyjściowego [2].

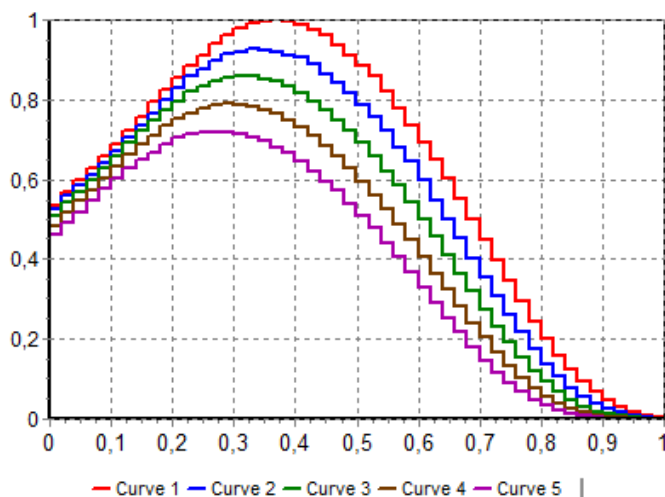


Rys. 2. Przykłady rozwiązań geometrii procesu obróbki radiacyjnej ścieków: A – USA [2, 3], B – Rosja [4], C – Korea [5], D – Brazylia [6, 7].



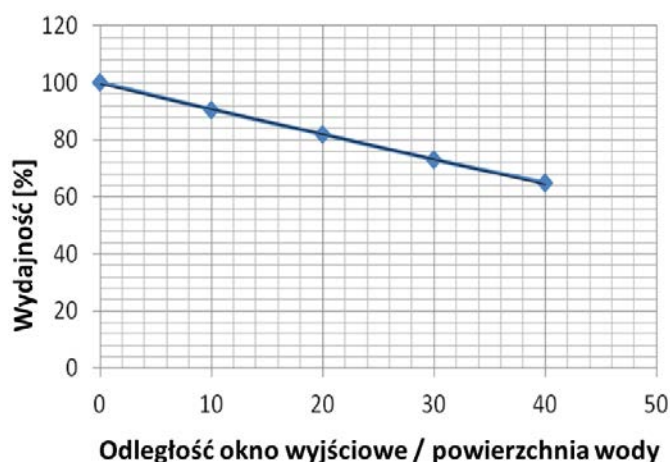
Rys. 3. Układ wyprowadzenia wiązki elektronów w akceleratorze oraz geometria strumienia cieczy poddawanej obróbce radiacyjnej w instalacji przeznaczony do utylizacji ścieków komunalnych zbudowanej w Korei [5].

Na rys. 3 przedstawiono układ z pionowym wyprowadzeniem wiązki elektronów w akceleratorze oraz geometrię poziomego strumienia cieczy poddawanej obróbce radiacyjnej w mobilnej instalacji przeznaczony do utylizacji ścieków komunalnych zbudowanej w Korei [5]. Istotnym parametrem radiacyjnej obróbki ścieków jest odległość między oknem wyjściowym akceleratora a powierzchnią ścieków. Zbyt mała odległość grozi zanieczyszczeniem i uszkodzeniem okna zazwyczaj wykonanego z cienkiej folii tytanowej. Zbyt duża odległość powoduje większe straty energii strumienia elektronów i dodatkową emisję ozonu.



Rys. 4. Rozkład dawki głębiny inicjowany wiązką elektronów o energii 1 MeV w wodzie o grubości warstwy 4,5 mm dla różnych odległości między oknem akceleratora a powierzchnią wody: 1 – 0 cm, 2 – 10 cm, 3 – 20 cm, 4 – 30 cm, 5 – 40 cm.

Z rys. 4 i 5 wynika, że spadek wydajności obróbki radiacyjnej ścieków przy energii elektronów 1 MeV w istotny sposób zależy od odległości między oknem wyjściowym akceleratora a powierzchnią cieczy poddanej obróbce radiacyjnej.



Rys. 5. Spadek wydajności obróbki radiacyjnej ścieków w zależności od odległości między oknem wyjściowym akceleratora a powierzchnią wody poddanej obróbce radiacyjnej wiązką elektronów o energii 1 MeV.

Rozkład dawki głębiny w procesie obróbki radiacyjnej zależy od gęstości i grubości warstwy obrabianej cieczy. Zasięg elektronów dla danej energii wyznacza obszar (objętość), w którym zachodzą procesy inicjowane promieniowaniem jonizującym. Dla zachowania wymaganej jednorodności procesu sterylizacji radiacyjnej wyrobów medycznych jednorazowego użytku wykorzystuje się przy napromienianiu jednostronnym obszar o grubości warstwy nieco powyżej 50% zasięgu elektronów. W procesie higienizacji osadów wymagania są mniej restrykcyjne.

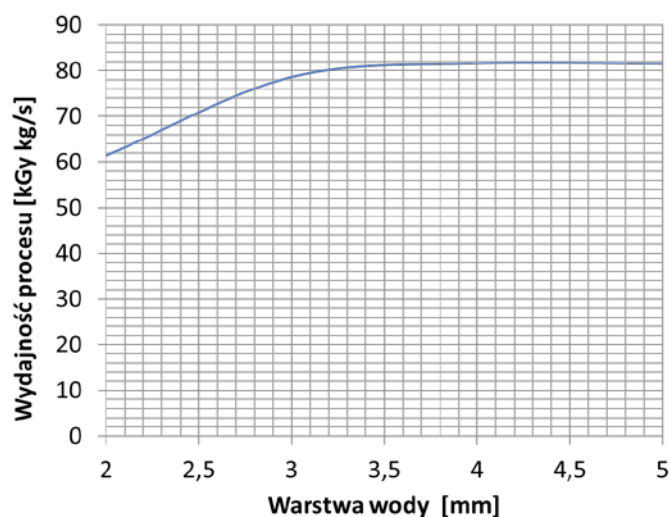
Ostatecznie grubość warstwy określić można na 80-90% zasięgu przy danej energii. Równomierność rozkładu dawki można znacznie poprawić, stosując mieszanie cieczy w trakcie procesu obróbki radiacyjnej.

Przedstawione w tabeli 1 i na rys. 6 parametry obróbki radiacyjnej wody w zależności od jej gęstości powierzchniowej (grubości warstwy) obliczono, korzystając z programu komputerowego Mode-RTL opartego na metodzie Monte Carlo, który pozwala określić rozkład dawki głębinowej w materiale poddanym obróbce radiacyjnej. Obliczenia wykonano z uwzględnieniem następujących parametrów: energia elektronów – 1 MeV, prąd średni wiązki – 100 mA, odległość okna akceleratora-powierzchnia wody – 20 cm, gęstość wody – 1 g/cm³, grubość okna Ti – 0,05 mm dla różnych wartości grubości warstwy wody poddanej obróbce radiacyjnej.

Tabela 1. Parametry obróbki radiacyjnej wody w zależności od jej gęstości powierzchniowej (grubości warstwy) przy energii elektronów 1 MeV.

Warstwa wody [mm]	D(o) [kGy]	D(max) [kGy]	D(wyj) [kGy]	D(śr) [kGy]	Wydajność [kG·kg/s]
5	2,63	3,23	0	1,63	81,5
4	2,59	3,25	0,38	2,04	81,6
3	2,59	3,24	1,22	2,62	78,6
2	2,60	3,28	2,75	3,07	61,4

Z przedstawionych danych wynika, że wydajność procesu praktycznie nie zmienia się powyżej grubości warstwy wody 3,5 mm. Jednocześnie wyraźnie spada dawka średnia, a tym samym skuteczność odkażania. Przy grubości warstwy 5 mm pojawia się frakcja niepoddana oddziaływaniu strumienia elektronów.



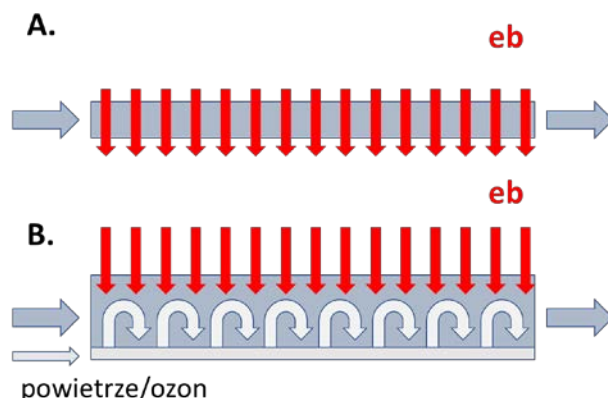
Rys. 6. Wydajność procesu obróbki radiacyjnej wody w zależności od jej gęstości powierzchniowej (grubości warstwy) przy energii elektronów 1 MeV.

Wykorzystanie wiązki elektronów w procesie obróbki radiacyjnej, η , zależy w istotnym stopniu od energii elektronów i geometrii rozkładu masy materiału poddanego obróbce radiacyjnej. Szereg innych czynników uwzględnia poniższa zależność:

$$\eta = \eta_p \times \eta_o \times \eta_z \times \eta_g \times \eta_s$$

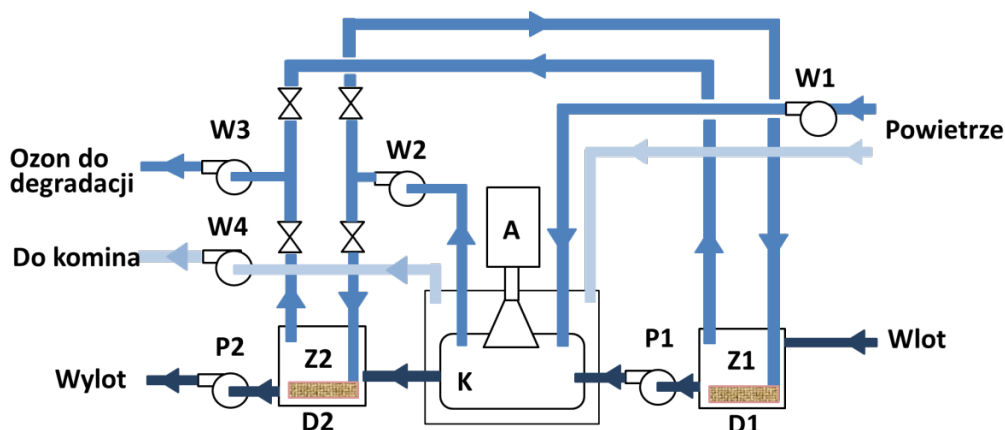
gdzie: η_p – straty w powietrzu (0,6-0,9), η_o – straty w oknie wyjściowym (0,8-0,95), η_z – straty wynikłe z określonego zasięgu wiązki elektronów (0,7-0,85), η_g – straty wynikłe z geometrii układu napromieniania (0,8-0,95).

Biorąc pod uwagę poszczególne współczynniki, sumaryczna wartość współczynnika wykorzystania wiązki elektronów w procesach obróbki radiacyjnej jest zawarta w przedziale 0,25-0,70. Dla procesu obróbki radiacyjnej ścieków najczęściej przyjmuje się 0,6 jako wartość współczynnika wykorzystania wiązki.



Rys. 7. Wykorzystanie ozonowania w procesie radiacyjnej obróbki ścieków: A – geometria obróbki radiacyjnej bez stosowania powietrza lub ozonu, B – geometria obróbki radiacyjnej z wykorzystaniem dodatkowego strumienia powietrza lub ozonu.

Na przykład zastosowanie ozonowania/napowietrzania nie zmienia wydajności procesu, mimo że grubość warstwy uległa zwiększeniu (rys. 7), ponieważ gęstość powierzchniowa została praktycznie taka sama. Ozonowanie zwiększa równomierność napromieniania (mieszanie wody). Ozon ma też specyficzne własności biobójcze.

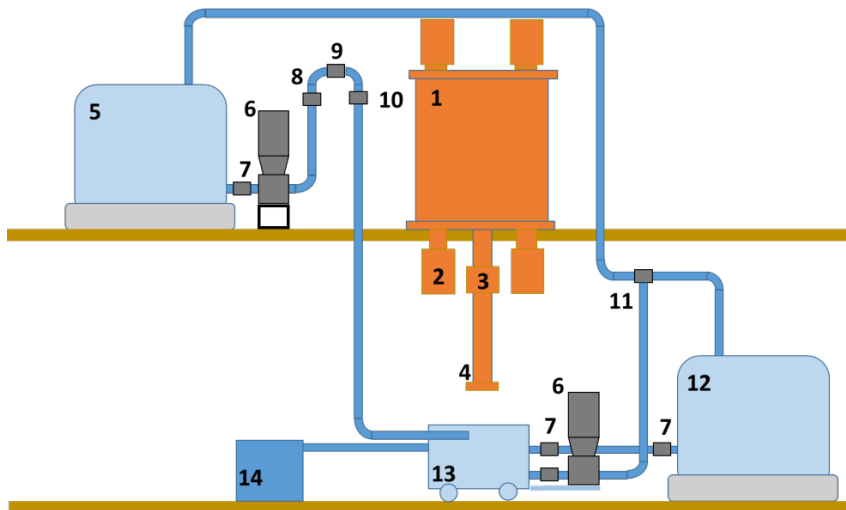


Rys. 8. Schemat blokowy instalacji oczyszczania ścieków przemysłowych: P1, P2 – pompy ścieków; W1-W4 – wentylatory; Z1, Z2 – zbiorniki; D1, D2 – dyfuzory; A – akcelerator; K – komora reakcyjna [8].

Na rys. 8 przedstawiono schemat blokowy instalacji oczyszczania ścieków przemysłowych o wydajności 10 000 m³/dobę zbudowanej w Korei [8]. Oprócz obróbki radiacyjnej zastosowano tam ozonowanie, wykorzystując ozon powstający w wyniku oddziaływania wiązki elektronów i powietrza. Ozonowanie odbywa się przed lub po obróbce radiacyjnej i nie wpływa bezpośrednio na rozkład dawki powierzchniowej.

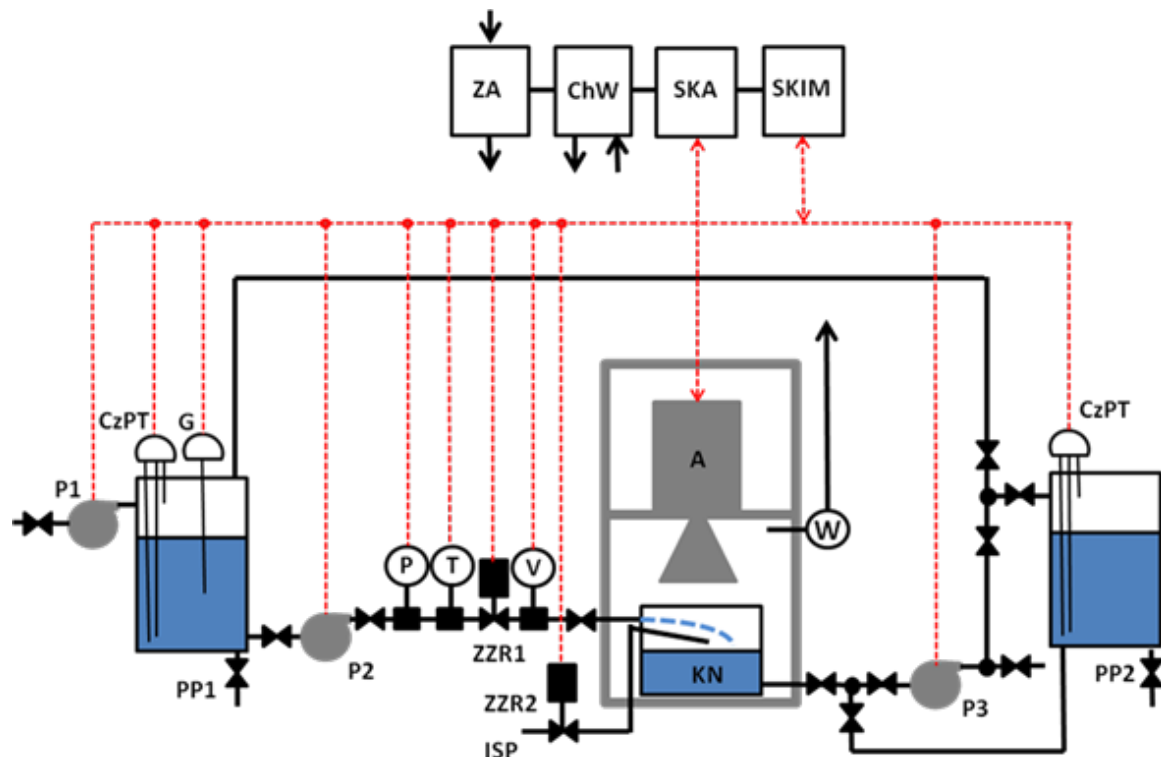
2.3. Instalacja laboratoryjna przeznaczona do ciągłej obróbki ścieków zbudowana w IChTJ

W Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (ICHTJ) prace nad wykorzystaniem wiązki elektronów w procesie higienizacji ścieków i osadów komunalnych podjęto jeszcze w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia [9]. Wynikiem prac eksperymentalnych i analizy ekonomicznej



Rys. 9. Schemat blokowy laboratoryjnej instalacji do ciągłej obróbki ścieków: 1 – akcelerator IŁU-6, 2 – pompy jonowe, 3 – elektromagnes przemiatający, 4 – skaner, 5 – zbiornik na wejściu, 6 – pompa, 7 – zawór, 8 – czujnik ciśnienia, 9 – zawór sterowany, 10 – czujnik przepływu, 11 – zawór trójdzielny, 12 – zbiornik na wyjściu, 13 – komora reakcyjna, 14 – generator ozonu.

było opracowanie studium wykonalności dla oczyszczalni ścieków komunalnych w Otwocku [10]. Kolejnym obszarem zainteresowań było unieszkodliwianie ścieków przemysłowych [11]. Na rys. 9 przedstawiono schemat blokowy, a na rys. 10 – schemat technologiczny laboratoryjnej instalacji przeznaczonej do ciągłej obróbki ścieków (fazy ciekłej), zbudowanej w IChTJ. Zgodnie z założeniami instalacja laboratoryjna jest przystosowana do współpracy z akceleratorem elektronów typu IŁU-6.

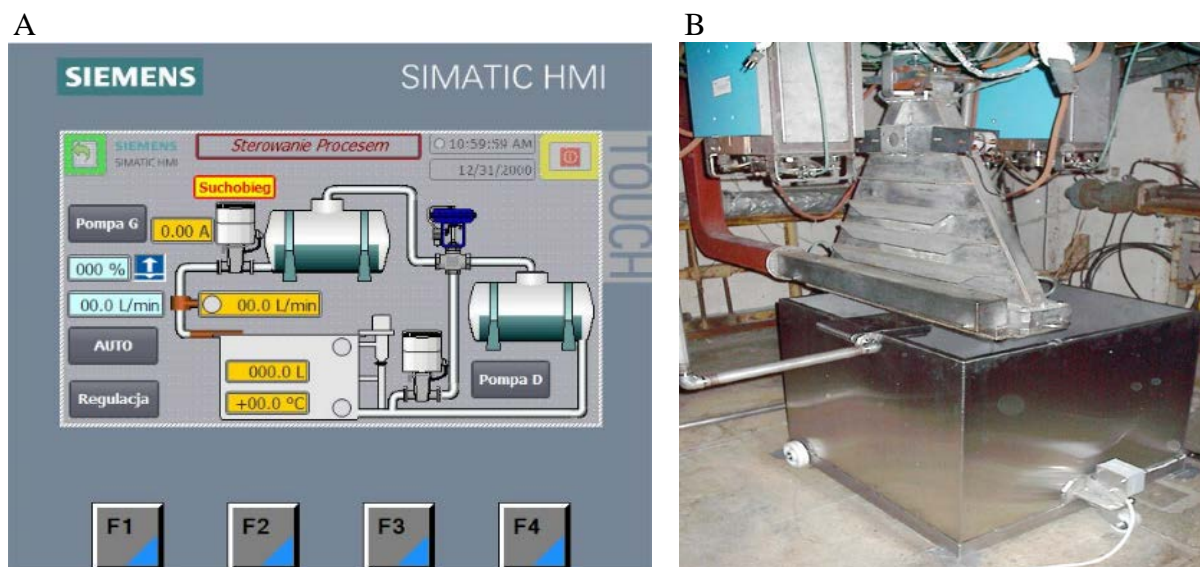


Rys. 10. Schemat technologiczny laboratoryjnej instalacji do ciągłej obróbki ścieków: ZA – zasilanie akceleratora; ChW – układ chłodzenia wodnego; SKA – system kontroli akceleratora; SKIM – system kontroli instalacji modelowej; P1-P3 – pompy; CzPT – czujniki poziomu i temperatury; G – grzejnik; PP1, PP2 – pobór próbek; P – czujnik ciśnienia; T – czujnik temperatury; ZZR1, ZZR2 – zawór zdalnie regulowany; V – czujnik przepływu; ISP – instalacja sprężonego powietrza; A – akcelerator; KN – komora napromieniania; W – wentylator.

Instalacja laboratoryjna jest wyposażona w cyfrowy system kontroli (SKIM) zapewniający stabilne warunki obróbki radiacyjnej, w tym uformowany strumień cieczy o założonej geometrii i określoną dawkę promieniowania pozwalającą na uzyskanie zamierzonego efektu odkażania.

Instalacja jest też wyposażona w dwa zbiorniki o pojemności 0,6 m³ każdy, co umożliwia prowadzenie procesu w dostatecznie długim czasie i w szerokim zakresie prędkości przepływu ścieków. Układ pompy skojarzony ze zdalnie regulowanym zaworem umożliwia przetestowanie układu formującego strumień cieczy. Umiejscowiony w zbiorniku wejściowym system grzewczy pozwala na ocenę przebiegu procesu w zależności od temperatury. Z uwagi na możliwość korozji indukowanej przez ścieki instalacja modelowa została wykonana z materiałów i komponentów (zawory) odpornych na korozję.

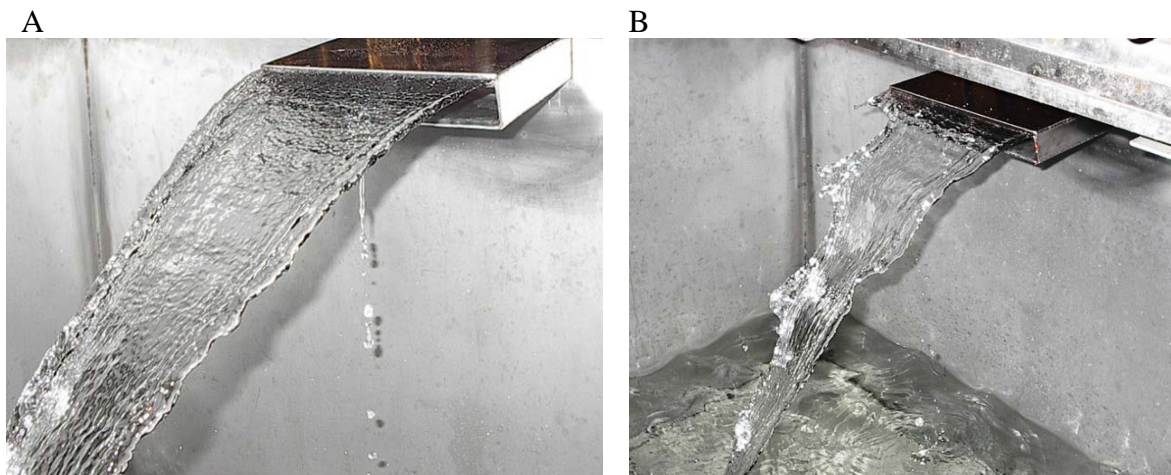
Układ zasilania pompy został skojarzony z mikroprocesorowym układem sterowania (rys. 11A), umożliwiając regulowany przepływ cieczy poddawanej obróbce radiacyjnej w układzie o założonej geometrii (rys. 11B).



Rys. 11. Instalacja laboratoryjna do ciągłej obróbki ścieków: A – panel dotykowy układu sterowania, B – wyprowadzenie wiązki oraz zbiornik wyposażony w dyszę.

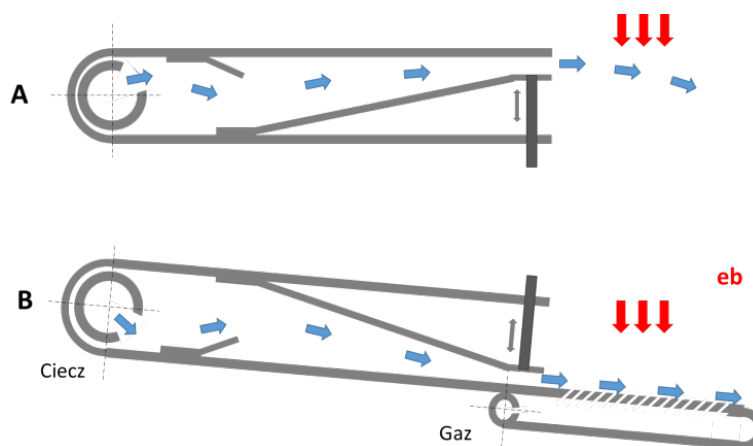
Na rys. 12 zaprezentowano zdjęcia z przeprowadzonych testów. Widoczne są na nich strumienie cieczy uformowanej w różnych warunkach przepływu. Dysza formująca ma wymiary 20 cm × 0,25-0,3 cm. Znając wydajność określoną parametrami pompy (ciśnieniem), można wyznaczyć prędkość liniową strumienia. Zbyt małe prędkości liniowe powodują znaczne odchylenie płaszczyzny strumienia od poziomu, co wydłuża drogę przyspieszonych elektronów w cieczy w trakcie procesu napromieniania. Zbyt duże prędkości (powyżej 5 m/s) powodują turbulencje i tym samym pogarszają warunki procesu obróbki radiacyjnej.

Podstawowym zagadnieniem obróbki radiacyjnej jest optymalizacja konstrukcji komory do napromieniania przy zachowaniu właściwych parametrów geometrycznych strumienia produktu i założonej odpowiednio do skali procesu wydajności instalacji. Geometrię strumienia określają wartości podstawowych parametrów procesu obróbki radiacyjnej, tj. energia elektronów i szerokość przemieszczania wiązki. W efekcie można oszacować wykorzystanie wiązki elektronów w trakcie obróbki radiacyjnej. Grubość (wysokość) warstwy cieczy jest powiązana z energią elektronów i założoną jednorodnością napromieniania. Szerokość wiązki w powiązaniu z grubością i prędkością przepływu określa wydajność, która ostatecznie zależy od prądu wiązki, przy założonej dawce promieniowania jonizującego. Narzuca to konieczność określenia dawki promieniowania w powiązaniu z oceną wpływu jednorodności procesu napromieniania na zakładane parametry.



Rys. 12. Widok uformowanego strumienia cieczy na wyjściu dyszy zainstalowanej w komorze do napromieniania: A – przepływ 60 l/min, 2 m/s; B – widok uformowanego strumienia cieczy o wysokości 3 mm na wyjściu dyszy zainstalowanej w komorze do napromieniania przy ciśnieniu roboczym na wyjściu pompy na poziomie 50% wartości nominalnej.

Program prac eksperymentalnych z wykorzystaniem instalacji laboratoryjnej przewiduje uzyskanie informacji umożliwiających właściwe przygotowanie założeń techniczno-ekonomicznych dla instalacji przemysłowej w odpowiednio większej skali. Istnieje również możliwość modyfikacji tej instalacji według schematu przedstawionego na rys. 13, co pozwoli na formowanie strumienia w powietrzu lub formowanie strumienia na płaskim podłożu z jednoczesnym napowietrzaniem/ozonowaniem zmniejszającym gęstość strumienia cieczy. Jako gazu można użyć sprężonego powietrza lub rozważyć zastosowanie ozonu w celu intensyfikacji efektu obróbki radiacyjnej.



Rys. 13. Schematyczny przekrój poprzeczny przez dyszę formującą strumień cieczy: A – formowanie strumienia cieczy w powietrzu, B – formowanie strumienia cieczy na podłożu z możliwością wykorzystania strumienia gazu napowietrzającego ciecz.

Zbudowaną w IChTJ instalację wyposażono w element pozwalający na regulację wysokości szczeliny. Dla celów eksperymentalnych parametr ten można zmieniać w szerokich granicach od 1 do 10 mm. Dobór wysokości szczeliny wpływa na grubość (wysokość) strumienia w trakcie napromieniania. Uzupełnienie dyszy podłożem widocznym na rys. 12B umożliwia napowietrzanie lub ozonowanie. Warto zaznaczyć, że napowietrzanie zmniejsza gęstość cieczy, uśrednia rozkład dawki, a także może istotnie zmienić efekt napromieniania [12].

2.4. Aspekty ekonomiczne technologii radiacyjnych

Techniczne i ekonomiczne korzyści, jakie można osiągnąć w porównaniu z technologiami klasycznymi przy realizacji określonych zadań, uzasadniają zastosowanie technologii radiacyjnych w skali masowej. Jak wiadomo, w technologiach radiacyjnych wykorzystuje się zarówno źródła izotopowe, jak i wiązkę przyspieszonych elektronów. Zalety stosowania wiązki elektronów w porównaniu ze źródłami izotopowymi to:

- wysoka wydajność instalacji wyposażonych w akceleratory elektronów;
- możliwość załączania i wyłączania urządzeń, a tym samym promieniowania jonizującego;
- pełna kontrola parametrów procesu;
- wysoka sprawność wykorzystania energii elektrycznej;
- mały obszar napromieniania;
- łatwość wprowadzenia do napromienianego obiektu znacznych ilości energii;
- prosty układ transportu obiektów poddawanych napromienianiu;
- małe koszty jednostkowe;
- większa akceptacja społeczna akceleratorowej instalacji radiacyjnej.

Do wad technologii radiacyjnej z wykorzystaniem wiązki elektronów należą: ograniczony zasięg elektronów, wyższy koszt inwestycyjny i bardziej złożona eksploatacja (serwis urządzeń). Poznanie czynników wpływających na wielkość strat wiązki elektronów pozwala na ich ograniczenie poprzez optymalizację konstrukcji urządzeń technologicznych.

Do najistotniejszych czynników, które mają wpływ na efekty ekonomiczne działania instalacji radiacyjnej zaliczyć należy:

- wielkość dawki promieniowania jonizującego charakterystyczna dla danego procesu oraz stopień wykorzystania promieniowania jonizującego,
- koszty inwestycyjne (koszty akceleratora, budynku, osłon biologicznych, wyposażenia oraz montażu i uruchomienia),
- koszty eksploatacyjne (koszty osobowe, części zamiennych, energii elektrycznej, obsługi kapitału).

Tabela 2. Roczne koszty działania przykładowej instalacji radiacyjnej do oczyszczania ścieków komunalnych.

Rodzaj instalacji	Podstawowe parametry oraz urządzenia i podzespoły	Koszty [tys. PLN]*
Obróbka ścieków	Wydajność 500-1000 m ³ /dzień	7200
	Dawka 1-5 kGy	
Wyposażenie	Akcelerator elektronów o mocy wiązki 50 kW i energii elektronów 1-1,5 MeV	2800
	Pomieszczenie, osłony	1600
	Komora, orurowanie	800
	Zbiorniki	1200
	Inne	400
	Montaż i uruchomienie instalacji	400

* Szacunkowe koszty według dostępnych danych literaturowych przy założeniu kursu wymiany dolara na poziomie 1 USD = 3,9 PLN.

W tabeli 2 podano roczne koszty działania przykładowej instalacji do oczyszczania ścieków komunalnych. Koszty eksploatacyjne w skali roku przy pracy na jedną zmianę wynoszą 400 tys. PLN. Główne składniki tych kosztów stanowią:

- opłaty za elektryczność (1/3),
- koszty obsługi dla 2-osobowej zmiany eksploatacyjnej (1/3),
- koszty konserwacji (1/3),

Do kosztów eksploatacyjnych należy doliczyć ratę spłaty kredytu, koszty amortyzacji, koszty administracji.

W nowoczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych akceleratory wyposażone są w komputerowy system sterowania pracą. Z reguły taki system jest w stanie współpracować z urządzeniami pomocniczymi, jak transporter czy układ do napromieniania w systemie ciągłym, co umożliwia skuteczną kontrolę warunków napromieniania i eliminuje ewentualne błędy obsługi.

3. WYBÓR AKCELERATORA DO OBRÓBKI RADIACYJNEJ WODY BALASTOWEJ

3.1. Informacje ogólne

Akceleratory są kluczowymi urządzeniami instalacji radiacyjnych i decydują o sprawności procesu oraz efektach ekonomicznych zastosowanej technologii radiacyjnej. Budowane obecnie akceleratory charakteryzują się parametrami przydatnymi do zastosowań w zakresie ochrony środowiska. W technologiach radiacyjnych ważnym parametrem jest energia określająca zasięg działania elektronów w materiale poddawany obróbce radiacyjnej, a tym samym geometrię procesu napromieniania. Odpowiednio duża moc średnia wiązki zapewnia uzyskanie wymaganej wydajności procesu, minimalizację kosztów i umożliwia budowanie instalacji przystosowanych do pracy ciągłej. Do zasadniczych zalet akceleratorów stosowanych w obróbce radiacyjnej zaliczyć należy:

- dużą intensywność strumienia elektronów dającą możliwość ograniczenia czasu ekspozycji na promieniowanie w porównaniu ze źródłami gamma,
- określony zasięg elektronów pozwalający optymalizować wykorzystanie wiązki elektronów,
- łatwość zmiany parametrów akceleratora i kontroli procesu,
- możliwość wyłączenia urządzenia z sieci zasilającej.

Różnice między poszczególnymi rodzajami akceleratorów można sprowadzić do różnicy w wytwarzaniu pola elektrycznego przyspieszającego elektrony. W akceleratorach stosowanych w technice radiacyjnej napięcie przyspieszające jest wytwarzane przez:

- zasilacze wysokiego napięcia (akceleratory o działaniu wprost – akceleratory transformatorowe);
- generatory częstotliwości radiowych i mikrofalowych do zasilania rezonatorów, w których składowa elektryczna fali elektromagnetycznej jest wykorzystywana w procesie przyspieszania (akceleratory rezonansowe z jedną sekcją przyspieszającą, linowe akceleratory wielkiej częstotliwości).

Proces przyspieszania elektronów odbywa się w próżni, w której umieszczona jest katoda emitująca elektrony, a także sekcja przyspieszająca, układ transportu i przemiatania wiązki zakończony folią wyjściową.

Akceleratory transformatorowe dominują w zastosowaniach przemysłowych z uwagi na możliwość osiągnięcia dużej mocy wiązki przy wysokiej sprawności tych urządzeń. Budowane są akceleratory przyspieszające elektrony wykorzystujące napięcie nawet 5 MV. Dominują jednak urządzenia o energii 0,15-1 MeV. W porównaniu do akceleratorów opartych na metodach rezonansowych, akceleratory transformatorowe charakteryzują się większą mocą wiązki, niższą energią elektronów, niższym kosztem jednostkowym w przeliczeniu na 1 W mocy wiązki, większą niezawodnością, mniejszym zapotrzebowaniem na części zamienne i energię elektryczną.

Wady technologii radiacyjnej z wykorzystaniem wiązki elektronów są następujące: ograniczony zasięg elektronów, stosunkowo wysoki koszt inwestycyjny i bardziej złożona eksploatacja (serwisowanie urządzeń). Poznanie czynników wpływających na wielkość strat wiązki

elektronów pozwala na ich ograniczenie poprzez optymalizację konstrukcji urządzeń technologicznych.

3.2. Dostawcy akceleratorów

Na światowym rynku działa szereg firm specjalizujących się w budowie niskoenergetycznych akceleratorów transformatorowych. Do najbardziej znanych należą:

- EB Tech Co., Ltd.
170-9, Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34028, Korea
Tel.: +82-42-930-7510
Fax: +82-42-930-7500
E-mail: cleaner@eb-tech.com
Website: www.eb-tech.com
- BINP
Budker Institute of Nuclear Physics
11, Lavrentyev av., Novosibirsk, 630090, Russia
Tel.: +7 383 948 9705
Fax: +7 383 330 7163
- Vivirad
23, Rue Principale, 67117 Handschuheim, France
Tel.: +33 (0) 3 88 69 13 25
Fax: +33 (0) 3 88 69 16 18
E-mail: Informations@vivirad.com
- Wasik Associates, Inc.
29 Diana Lane, Dracut, MA 01826-1500, USA
Tel.: (978) 454 9787
Fax: (978) 454 0499
E-mail: bob@wasik.com
Website: www.wasik.com
- Wuxi El Pont Radiation Technology Co., Ltd.
No. 8, Weiye Road Qianqiao, Wuxi, Jiangsu, 214151 China
Tel.: 0086-510-83700387 / 83036175
Fax: 0086-510-83700387 / 83036175
E-mail: elpont@elpont.net, sales@elpont.net
Website: http://www.elpont.net

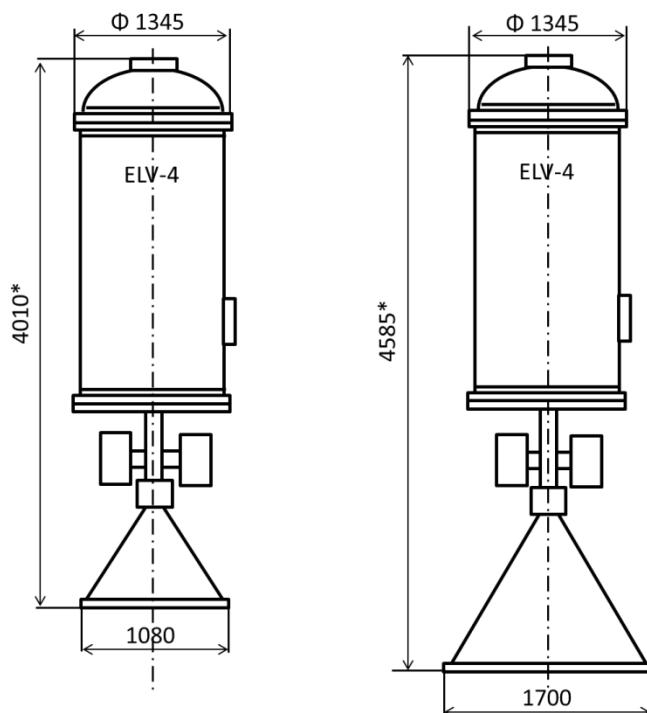
Przy wyborze akceleratora dla omawianej instalacji radiacyjnej należy uwzględnić: konstrukcję akceleratora (odpowiedni zakres energii i moc średnią wiązki przyspieszonych elektronów), producenta gwarantującego w dłuższej perspektywie czasowej nadzór techniczny, koszty zakupu, znajomość technologii stosowanej przez producenta i pozytywne opinie użytkowników. Ograniczone środki inwestycyjne na ogół przemawiają za wyborem akceleratora produkcji rosyjskiej. Akceleratory typu ELV budowane w Nowosybirsku, w Rosji spełniają podstawowe wymagania instalacji radiacyjnej wykorzystywanej w procesach związanych z ochroną środowiska. Urządzenia te mogą być eksploatowane nawet w trybie 24 h na dobę. Ich sprawność elektryczna jest bardzo wysoka i niekiedy przekracza 85%. Na rozważenie zasługuje akcelerator ELV-4 (1 MeV, 50 kW), którego charakterystykę podano w dalszej części raportu.

W trakcie negocjacji z producentem wybranego akceleratora należy oprócz ceny uzgodnić takie kwestie, jak:

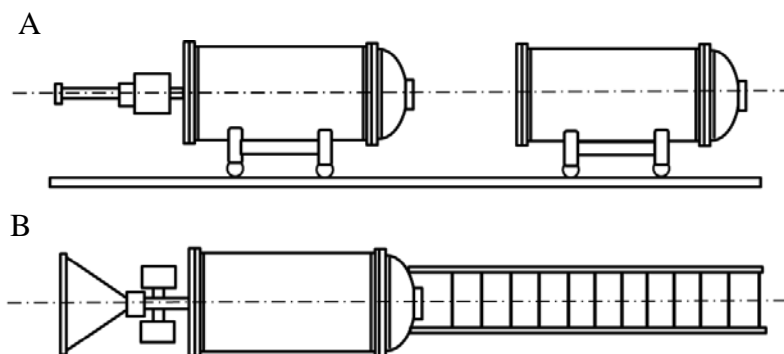
- podstawowe parametry wiązki elektronów: energia i moc wiązki;
- specyfikacja dostaw;
- pomocnicze parametry akceleratora: zasilanie, chłodzenie, gabaryty, szerokość przemiata-
nia wiązki, rozmieszczenie urządzeń pomocniczych;
- zestaw części zamiennych;
- terminy dostaw, warunki dostawy i gwarancji;



Rys. 14. Widok komory obróbki radiacyjnej z osłoną lokalną w instalacji mobilnej zbudowanej w Korei przez firmę EB Tech.



Rys. 15. Gabaryty akceleratora ELV-4 z układem wyprowadzenia wiązki zapewniającym przemiatanie na dystansie 100 cm (A) i 160 cm (B).



Rys. 16. Wariant instalacji z poziomym położeniem akceleratora ELV-4: A – rzut z boku, B – rzut z góry.

- zobowiązania dostawcy i użytkownika;
- konsultacje dotyczące projektu osłon, montażu i uruchomienia akceleratora;
- warunki montażu (udział pracowników producenta, wymagane wsparcie przez personel miejscowy, terminy, zapotrzebowanie na określone materiały i urządzenia, np. dźwig);
- warunki płatności (zwykle 30% przedpłaty po podpisaniu kontraktu, 60% po dostawie urządzeń, 10% po podpisaniu protokołu odbioru);
- szkolenie personelu użytkownika;
- zasady odbioru końcowego akceleratora.

Należy też wynegocjować możliwość wprowadzenia zmian, które wykraczają poza typowe rozwiązania stosowane przez producenta akceleratora, jak np. zmniejszenie wysokości instalowanych urządzeń, co można uzyskać poprzez zmianę położenia pomp tytanowych lub zmianę kształtu pokrywy obudowy ciśnieniowej.

Na rys. 14 przedstawiono widok komory obróbki radiacyjnej z osłoną lokalną w instalacji mobilnej zbudowanej w Korei przez firmę EB Tech. Pompy tytanowe zainstalowano na wysokości układu przemiatania, a nie bezpośrednio pod obudową ciśnieniową zasilacza WN jak to ma miejsce w akceleratorach typu ELV. Dzięki temu zmniejszono wysokość urządzenia o ok. 50 cm.

Prostsze technicznie jest zmniejszenie szerokości przemiatania wiązki z 160 do 100 cm. Na rys. 15 przedstawiono gabaryty akceleratora ELV-4 z układem wyprowadzenia wiązki zapewniającym jej przemiatanie na dystansie 100 i 160 cm. Jak łatwo zauważyć, wysokość akceleratora przy przemiataniu na dystansie 100 cm jest mniejsza o ponad 5 cm.

Niekiedy, a tak jest w tym przypadku, należy uzyskać możliwość wyprowadzenia wiązki równoległej, co wiąże się z instalacją dodatkowego elektromagnesu w układzie przemiatania, który zwykle nie należy do standardowego wyposażenia.

Podstawowy warunek, który musi zostać spełniony, to maksymalna odległość między sterownią a akceleratorem. Kwestią do uzgodnienia jest możliwość zdalnego sterowania pracą akceleratora. W przypadku zdalnego sterowania operator traci bezpośrednią (wzrokową) kontrolę nad wejściem do pomieszczeń o podwyższonym zagrożeniu radiologicznym. W związku z tym konieczne jest zastosowanie odpowiedniego systemu zabezpieczeń (osoba wkraczająca na teren kontrolowany musi uzyskać zgodę operatora).

Niekiedy producent akceleratora oferuje dostawę urządzeń kontrolnych promieniowania jonizującego.

Opcją jest zwykle dostawa cylindra Faradaya (beam catcher).

W przypadku realizacji wariantu instalacji z poziomym wyprowadzeniem wiązki elektronów, konieczna jest zgoda producenta akceleratora na dopuszczenia tego typu rozwiązania do eksploatacji (rys. 16). Realizacja tego rozwiązania oznacza dodatkowe koszty związane ze zmianą konstrukcji, która pozwoli na przemieszczanie osłony i obudowy ciśnieniowej podczas instalacji oraz prac remontowych.

4. PARAMETRY TECHNICZNE AKCELERATORA ELV-4

Na podstawie wstępnej oferty producenta akceleratorów typu ELV (BINP, Nowosybirsk, Rosja) wybrano do dalszych rozważań model ELV-4, z uwagi na jego korzystne parametry, umiarkowaną cenę i sprawdzone parametry eksploatacyjne. Z jednej strony energia elektronów ograniczona do 1 MeV stwarza trudności w dobraniu technologii prowadzenia procesu obróbki radiacyjnej, z drugiej strony niższa energia ogranicza wydatki na zakup akceleratora i ułatwia konstrukcję niezbędnych osłon. Podstawowe parametry akceleratora ELV-4 są następujące:

- energia elektronów: 0,5-1,0 MeV,
- niestabilność energetyczna: $\leq \pm 3\%$,
- prąd wiązki elektronów: 50 mA (max. 100 mA),
- niestabilność prądu wiązki elektronów: $\leq \pm 3\%$,
- moc wiązki elektronów: 50 kW (max. 100 kW),

- długość okna wyjściowego: 1,0 m (opcjonalnie 1,6 m),
- niejednorodność liniowej gęstości prądu wzdłuż okna urządzenia wyjściowego: $\leq \pm 10\%$,
- ciśnienie SF₆ wewnątrz naczynia: ≤ 10 atm.

4.1. Podstawowy zestaw dostawy

Podstawowy zestaw obejmuje:

- 1 akcelerator z sekcją przyspieszającą,
- 1 urządzenie wyjściowe z oknem 100 cm i systemem chłodzenia powietrzem,
- 1 system zasilania z przetwornicą częstotliwości,
- 1 instalację gazu izolacyjnego SF₆,
- 1 system próżniowy,
- 1 automatyczny system sterowania.

4.2. Zestaw części zamiennych na 2 lata eksploatacji

Zestaw części zamiennych na 2 lata eksploatacji obejmuje:

- 1 działo elektronowe w zestawie,
- 5 jednostek katodowych,
- 50 m folii okna wyjściowego,
- 10 sekcji prostownika wysokiego napięcia,
- 1 zestaw zapasowych elementów do elektroniki.

Zbiornik ciśnieniowy do akceleratora może zostać wyprodukowany w UE na koszt użytkownika. W takim przypadku cena akceleratora zostanie obniżona, aby zrekompensować koszty produkcji.

4.3. Wymagania dotyczące pomieszczeń i lokalizacji sprzętu

Projekt i wykonanie osłon oraz wyposażenie instalacji akceleratorowej w urządzenia technologiczne ma zapewnić użytkownik. Wymagania techniczne dotyczące wyposażenia i pomieszczenia dla akceleratora ELV wysokiego napięcia oraz dokumentacja wykonawcza dotycząca pomieszczeń, sanitariatów itp. powinny zostać przygotowane zgodnie z polskimi przepisami i uzgodnione z producentem akceleratora. Istnieje szereg rozwiązań osłon lokalnych, które są niezbędne dla bezpiecznej eksploatacji akceleratora. Jest możliwość uzgodnienia szczegółów konstrukcyjnych podzespołów akceleratora i rozwiązań osłon lokalnych z przedstawicielami producenta podczas projektowania instalacji. Pomieszczenie wyprowadzenia wiązki akceleratora powinno być wyposażone w wentylację wyciągową i drzwi z urządzeniami blokującymi (blokadami).

4.4. Zasilanie

Parametry systemu zasilania są następujące:

- napięcie: 220/380 V (inna wartość jest do rozważenia),
- zużycie energii: 70 kW,
- moc zainstalowana: 100 KVA,
- fazy: 3,
- uziemiony przewód neutralny,
- odchylenie napięcia: $\leq \pm 10\%$,
- częstotliwość: 50 Hz.

4.5. Woda chłodząca

Akcelerator powinien być chłodzony wodą, a układ chłodzenia powinien spełniać następujące warunki:

- ciśnienie wody na wlocie: ≤ 588 kPa (6 atm),
- różnica ciśnienia wody na wlocie i wylocie: 592 kPa (4 atm),
- temperatura wody na wejściu: $\leq +25^{\circ}\text{C}$,
- zużycie wody: $2,5$ m³/h,
- wlot i wylot z układu chłodzenia z zamontowanymi manometrami.

Możliwe jest użycie schłodzonej lub zmiękczonej chemicznie wody, która była już używana do chłodzenia innych urządzeń.

4.6. Wymagania dotyczące urządzeń dźwigowych

W celu instalacji i serwisu akceleratora pomieszczenie, w którym znajduje się prostownik wysokiego napięcia, powinno być wyposażone w urządzenie podnoszące poruszające się poziomo w jednym lub dwóch kierunkach. Udźwig powinien wynosić nie mniej niż 1200 kg, a prędkość podnoszenia nie powinna przekraczać 2 m/min. Pożądane jest dwubiegowe urządzenie podnoszące.

4.7. Zobowiązania dostawcy

Producent ma zapewnić know-how w zakresie usług akceleracyjnych, tj.:

- dane wymagane do zaprojektowania pomieszczenia akceleratora (ekranowanie przed promieniowaniem, systemy zasilania, instalacja elektryczna, wentylacja wyciągowa, blokowanie drzwi, itp.);
- doradztwo podczas projektowania osłon;
- szkolenie i podnoszenie poziomu umiejętności personelu w celu zagwarantowania normalnej pracy akceleratorów i świadczenia usług;
- specyfikacje techniczne i instrukcje obsługi jednostek i komponentów w celu umożliwienia samodzielnej naprawy instalacji akceleratorowej;
- wykonanie prac rozruchowych i serwisowych przez techników BINP;
- oprogramowanie zgodnie z wymaganiami klienta,
- paszport akceleratora (certyfikat).

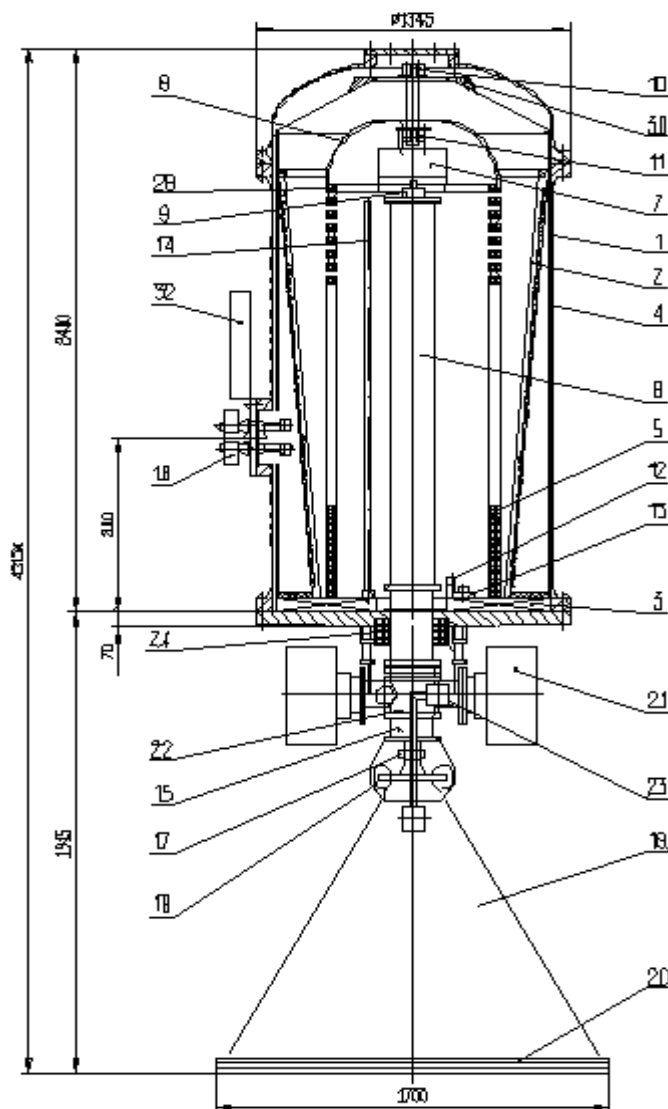
4.8. Zobowiązania użytkownika

Użytkownik akceleratora zapewni:

- pomieszczenie dla akceleratora przygotowane zgodnie z wymaganiami technicznymi dostawcy;
- dostępność zasilania trójfazowego i napięcia 220/380 V oraz uziemionego przewodu neutralnego;
- zasilanie awaryjne (UPS) o mocy 2 kW dla systemu sterowania;
- wodę do chłodzenia;
- wentylację wyciągową o wydajności nie mniejszej niż 5000 m³/h przy wieży wyciągowej 10-15 m;
- SF₆ (gaz izolacyjny), przyrządy do kontroli dozymetrycznej i część technologiczną obiektu;
- umowę na sprzęt z lokalnymi służbami inspekcji sanitarnej (organem) zgodnie z polskimi standardami.

4.9. Zasada działania akceleratora typu ELV

Układ zasilania akceleratora ELV-4 zapewnia kształtowanie napięcia na uzwojeniu pierwotnym transformatora wyposażonego w prostownik wysokiego napięcia, komutację napięcia źródłowego, bezpieczeństwo kompensacji mocy biernej sieci elektrycznej i prostownika wysokonapięciowego, a także transformację wartości rezystancji wejściowej zgodnie z prądem i napięciem obciążenia w celu dopasowania do przetwornicy częstotliwości. Wszystkie przełączenia operacyjne w układzie zasilania są kontrolowane przez program sterujący bez udziału operatora.



Rys. 17. Widok ogólny akceleratora ELV-4 o energii elektronów 1 MeV: 1 – obudowa ciśnieniowa; 2 – uzwojenie pierwotne; 3, 4 – ekrany magnetyczne; 5 – sekcje prostownika; 6 – sekcja przyspieszająca; 7 – jednostka sterująca działem elektronowym; 8 – elektroda wysokiego napięcia; 9 – działo elektronowe; 10, 11 – kanały optyczne do sterowania działem; 12 – dzielnik sekcji; 13 – jednostka kondensatorów; 14 – dzielniki; 15 – zawór próżniowy; 16 – zaciski uzwojenia pierwotnego; 17, 18 – cewki skanujące; 19 – urządzenie do ekstrakcji; 20 – rama okna wyjściowego; 21 – pompy próżniowe; 22 – element próżniowy; 23 – zawór próżniowy; 28 – podstawa elektrody wysokonapięciowej; 29 – soczewka magnetyczna; 30 – ekran wysokiego napięcia; 32 – zestaw zacisków.

Widok ogólny akceleratora typu ELV-4 z urządzeniem do wyprowadzenia wiązki pokazano na rys. 17. Wewnątrz zbiornika wypełnionego gazem SF₆ znajduje się prostownik wysokiego napięcia z wbudowaną sekcją przyspieszającą wiązkę elektronów, elektrodą wysokiego

napięcia i jednostką sterującą działem elektronowym. Położenie sekcji przyspieszającej w kolumnie prostownika wysokiego napięcia sprawia, że akceleratory ELV-4 są najbardziej kompaktowe wśród urządzeń tej klasy. Elementy systemu próżniowego i urządzenie wyjściowe są przymocowane do dna zbiornika. Elektrony emitowane przez katodę, umieszczoną na górnym końcu sekcji przyspieszającej, mają całkowitą energię eU , gdzie U jest napięciem przykładowym do sekcji przyspieszającej. Wiązka elektronów przechodzi przez układ próżniowy i dociera do urządzenia wyjściowego, w którym są rozmieszczone elektromagnesy skanujące. Elektromagnesy te zapewniają równomierny rozkład intensywności elektronów wzdłuż folii wyjściowej, przez którą wiązka elektronów jest wyprowadzana na zewnątrz akceleratora. Napromieniany materiał jest transportowany pod ramą okna wyjściowego akceleratora.

Próżnię roboczą w sekcji przyspieszającej zapewniają dwie pompy magneto-wyładowcze (jonowe). Wstępne uruchomienie układu próżniowego zapewnia próżniowa pompa elektromechaniczna. Z reguły urządzenie to jest używane przy pierwszym uruchomieniu lub po otwarciu układu próżniowego (montaż, zmiana folii lub katody). System gazowy zapewnia napełnianie zbiornika ciśnieniowego gazem SF_6 i jego magazynowanie podczas działania prostownika wysokiego napięcia.

Wszystkie przełączenia operacyjne w układzie zasilania są kontrolowane przez program sterujący bez udziału operatora. Automatyczne sterowanie akceleratorem elektronów ELV-4 odbywa się za pomocą układu sterowania (rys. 18). Układ ten automatycznie kontroluje:

- włączanie i wyłączanie akceleratora;
- strojenie akceleratora do danego trybu i sterowanie tym trybem, synchronizację akceleratora i pracę urządzeń technologicznych;
- diagnostykę serwisową systemów akceleratora przed uruchomieniem i podczas pracy;
- wizualne wskazania parametrów świateł sygnalizacyjnych i stanu systemów akceleratorów.

Do podstawowych podzespołów akceleratora ELV-4 należą:

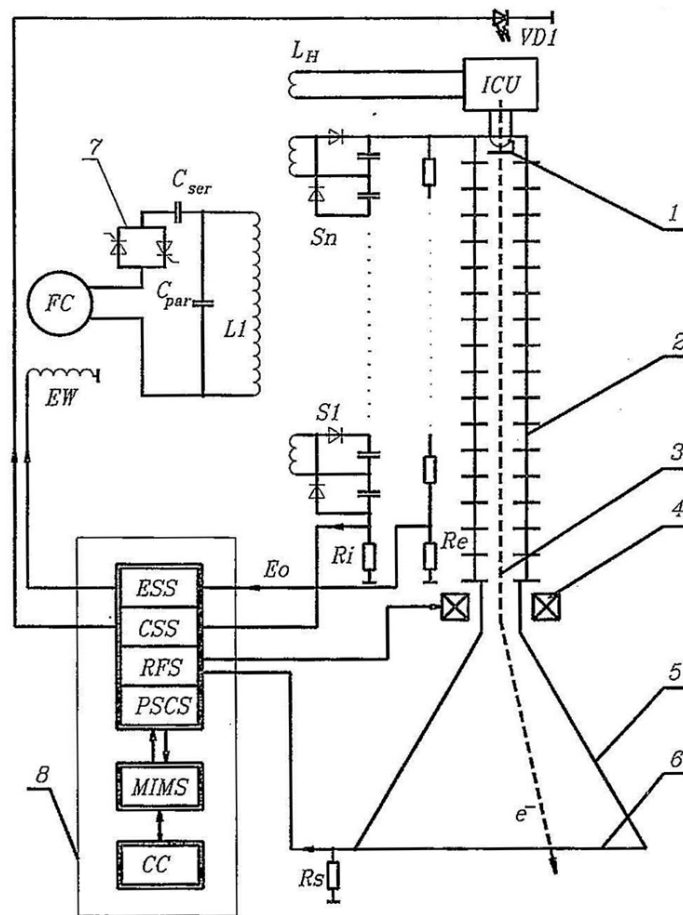
- szafa zasilająca – przetwornica napięcia 400 Hz,
- system gazowy do odzyskiwania gazu SF_6 ,
- pompa próżniowa – pompowanie wstępne,
- dystrybutor wody chłodzącej,
- dmuchawa do chłodzenia folii powietrzem (rys. 19).

Ich rozmieszczenie wokół urządzeń chronionych osłoną lokalną należy uzgodnić z producentem akceleratora.

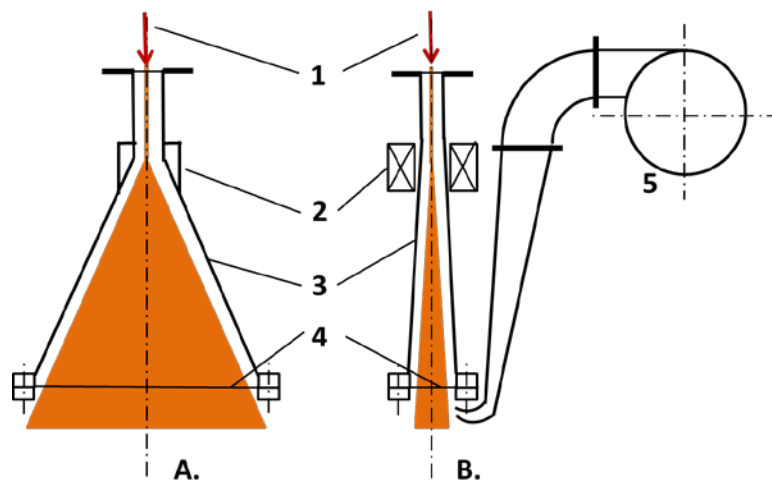
Na rys. 19 pokazano układ wyjściowy akceleratora wyposażony w dmuchawę do intensywnego chłodzenia folii tytanowej wąskim strumieniem powietrza. Skuteczne chłodzenie okna wyjściowego przedłuża jego żywotność. Innym zastosowanym rozwiązaniem o podobnym działaniu jest przemiatanie wiązki w dwóch płaszczyznach przy wykorzystaniu dwóch par elektromagnesów, co w efekcie prowadzi do bardziej równomiernego termicznego obciążenia folii tytanowej. Maksymalny kąt odchylenia wiązki wynosi 30° .

Na uwagę zasługuje możliwość optymalizacji grubości osłon pomieszczenia, w którym zainstalowany jest zbiornik ciśnieniowy z układem generatora wysokiego napięcia, w zależności od właściwości osłonnych zbiornika ciśnieniowego. Istnieje możliwość wyprowadzenia części tego pomieszczenia nad poziom pokładu. W tym przypadku akcelerator powinien być szczelnie zabezpieczony ze względu na warunki atmosferyczne oraz powinien spełniać wymogi dotyczące osłony radiologicznej. Przykrywa obudowy powinna być demontowalna w celu zainstalowania akceleratora. Podczas montażu obudowy ciśnieniowej lub późniejszych prac serwisowych zachodzi konieczność korzystania z zewnętrznego urządzenia dźwigowego o odpowiednim udźwigu i zasięgu.

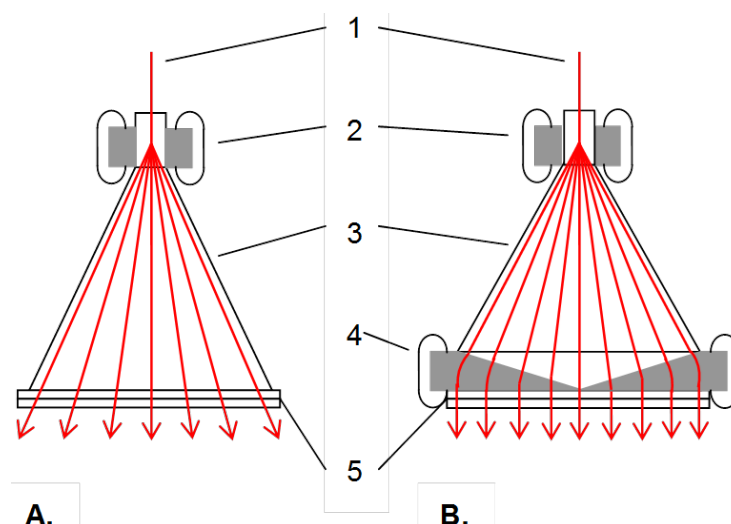
Na rys. 20 przedstawiono schematycznie urządzenie wyjściowe akceleratora. Na rys. 20A pokazano typową konfigurację urządzenia wyjściowego z przemiataniem liniowym stosowanym przez producentów akceleratora, a na rys. 20B – konfigurację z elektromagnesem korekcyjnym umożliwiającym wyprowadzenie równoległego strumienia elektronów na zadanym odcinku. Takie rozwiązanie ma szereg zalet, do których należy: bardziej równomierny rozkład dawki związany z optymalnym wykorzystaniem zasięgu elektronów, uniknięcie strat wiązki i lepsze wykorzystanie wiązki na skrajach obszaru obróbki radiacyjnej.



Rys. 18. Uproszczony schemat układu sterowania stosowanego w akceleratorach typu ELV: 1 – katoda działa elektronowego; 2 – sekcja przyspieszająca; 3 – wiązka elektronów; 4 – cewki układu przemiata-
 nia; 5 – komora przemiata-
 nia wiązki; 6 – folia tytanowa; 7 – klucz tyrystorowy; 8 – układ kontroli (ESS – układ stabilizacji energii, CSS – układ stabilizacji prądu wiązki, RFS – układ formowania rastra przemiata-
 nia wiązki, MIMS – układ pomiarowy, CC – komputer, PSCS – zasilacz); FC – konwerter czę-
 stotliwości sieci zasilającej; ICU – układ regulacji prądu wiązki; EW – uzwojenie transformatora zasilają-
 cego; R_s , R_i , R_e – oporniki pomiarowe; S_1 , S_2 – diody prostownicze; E_o – sygnał zwrotny; L_1 –
 uzwojenie pierwotne transformatora wysokiego napięcia; C_{par} , C_{ser} – pojemności; L_H – uzwojenie zasil-
 ające żarzenia działa elektronowego; VD1 – fotodioda.



Rys. 19. Układ wyjściowy akceleratora wyposażony w dmuchawę do chłodzenia folii tytanowej powie-
 trzem: A – widok w kierunku przemiata-
 nia, B – przekrój poprzeczny; 1 – wiązka elektronów, 2 – elektro-
 magnes przemiata-
 nia wiązki, 3 – obudowa próżniowa układu przemiata-
 nia wiązki, 4 – folia tytanowa
 o grubości 50 μm , 5 – wentylator.



Rys. 20. Urządzenie wyjściowe akceleratora: A – przemiatanie liniowe, B – wiązka równoległa; 1 – wiązka elektronów, 2 – elektromagnes przemiatania, 3 – obudowa, 4 – elektromagnes korekcyjny, 5 – folia wyjściowa.

5. PROCES OBRÓBKİ RADIACYJNEJ

5.1. Obróbka radiacyjna wód balastowych

Obróbka radiacyjna strumieniem szybkich elektronów posiada szereg istotnych zalet w porównaniu do innych procesów dezynfekcji ścieków:

- Jest prosta, efektywna i ekonomiczna oraz pozwala uzyskać powtarzalne rezultaty i prowadzić proces na odpowiednio dużą skalę.
- Stosunkowo łatwo można uzupełnić istniejący w oczyszczalni ciąg technologiczny o węzeł obróbki radiacyjnej.
- Możliwe jest zaprojektowanie i odbiór instalacji radiacyjnej przez polskich specjalistów.
- Możliwa jest pełna automatyzacja procesu dezynfekcji radiacyjnej i wyeliminowanie bezpośredniego kontaktu obsługi ze skażonymi wodami balastowymi.
- Dezynfekowane osady ściekowe mogą znaleźć zastosowanie do kondycjonowania gleby, a także przyczynić się do zwiększenia zbiorów poprzez wyeliminowanie ryzyka zakażenia.

Wydajność instalacji radiacyjnej można określić na podstawie zależności:

$$R_e = 3600 \times F_{pe} \times P/D \text{ [kg/h]}$$

gdzie: F_{pe} – współczynnik wykorzystania mocy średniej wiązki elektronów, P – moc średnia wiązki [kW], D – dawka [kGy].

Rozkład dawki promieniowania jonizującego w materiale poddanym napromienianiu strumieniem szybkich elektronów jest nieliniowy. Dla zachowania przyjętego poziomu niejednorodności w napromienianym obiekcie część energii strumienia elektronów pozostaje niewykorzystana, co niekiedy można zmienić poprzez dwustronne napromienianie. W praktyce współczynnik F_{pe} zależy od wielu czynników i mieści się w przedziale 5-60%. Wyższa efektywność jest możliwa jedynie dla technologii napromieniania folii lub modyfikacji powierzchni, dla których parametr ten sięga 70%. W przypadku obróbki ścieków przyjmuje się współczynnik wykorzystania wiązki na poziomie 60%.

Niska efektywność procesu obróbki radiacyjnej może być uzasadniona jedynie dla obiektów, których koszt jednostkowy jest wystarczająco wysoki. Wielkość strat mocy wiązki elektronów zależy od konstrukcji akceleratora i urządzeń transportowych, a także od geometrii obróbki radiacyjnej. Przyjmując gęstość 1 g/cm^3 dla wód balastowych, praktyczny zasięg użytkowy elektronów o energii 1 MeV wynosi 3 mm. Na ograniczenie zasięgu w materiale poddawany

obróbce radiacyjnej wpływa zastosowanie w urządzeniu wyprowadzenia wiązki elektronów folii tytanowej o grubości 50 μm oraz odległość rzędu 20 cm między folią tytanową a powierzchnią materiału poddawanego obróbce.

5.2. Wydajność instalacji

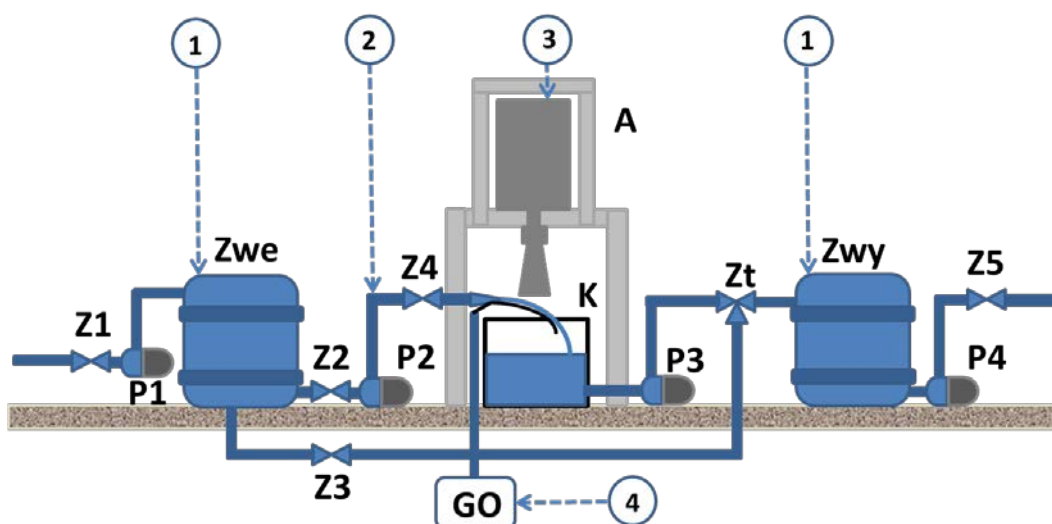
Parametry instalacji radiacyjnej są następujące:

- energia elektronów: 1 MeV,
- moc wiązki: 50 kW,
- szerokość przemiatania: 80 cm,
- sprawność procesu: 60%,
- dawka: 5 kGy,
- gęstość osadu: 1 g/cm^3 ,
- grubość warstwy: 3 mm,
- powierzchnia poprzeczna cieczy w trakcie obróbki radiacyjnej: 24 cm^2 ,
- wydajność procesu, $R_e = F_{pe} \times P/D$: $0,6 \times 50/5 = 6 \text{ kg/s} = 21\,600 \text{ kg/h} = 21,6 \text{ m}^3/\text{h} = 21,6 \text{ t/h}$,
- odcinek napromieniony w ciągu 1 s, L: $6000/24 = 250 \text{ cm}$,
- prędkość obróbki radiacyjnej, V: $250 \text{ cm/s} = 15\,000 \text{ cm/min} = 150 \text{ m/min} = 2,5 \text{ m/s}$.

Przy zapotrzebowaniu 120 t/d i przy pełnej mocy akceleratora instalacja będzie pracowała 5,6 h na dobę. Prędkość liniowa wód balastowych poddawanych obróbce radiacyjnej wyniesie 2,5 m/s, co zapewnia uzyskanie prawidłowego kształtu strumienia cieczy.

5.3. Koncepcja węzła obróbki radiacyjnej wód balastowych

Obiekt przeznaczony do radiacyjnej higienizacji wód balastowych zainstalowany w pomieszczeniach suchego doku powinien być wyposażony w osłony lokalne dla zabezpieczenia pomieszczenia z wyprowadzeniem wiązki elektronów i komory reakcyjnej oraz oddzielną osłonę lokalną zabezpieczającą obudowę ciśnieniową wraz ze znajdującymi się w jej wnętrzu elementami akceleratora (rys. 21). Ściany osłonowe powinny być wykonane z płyt stalowych o łącznej grubości rzędu 35 cm.



Rys. 21. Koncepcja węzła radiacyjnego wraz z osłonami lokalnymi komory reakcyjnej i obudowy ciśnieniowej: Z1-Z5 – zawory odcinające, P1-P4 – pompy wody balastowej, Zve – zbiornik wejściowy, Zwy – zbiornik wyjściowy, Zt – zawór trójdrożny, A – akcelerator, K – komora reakcyjna, GO – generator ozonu. Elementy automatyki i kontroli procesu: 1 – pomiar temperatury, 2 – kontrola parametrów przepływu wody balastowej, 3 – kontrola pracy akceleratora i regulacja prądu wiązki, 4 – kontrola parametrów przepływu ozonu.

Podstawowe parametry i funkcje poszczególnych urządzeń i instalacji umożliwiających prowadzenie procesu higienizacji radiacyjnej wód balastowych są następujące:

- a) akcelerator:
 - ciągły pomiar energii elektronów [MeV],
 - ciągły pomiar prądu wiązki [mA],
 - pomiar przepływu wody chłodzącej [l/min],
 - pomiar temperatury na wejściu i wyjściu wody chłodzącej [°C];
- b) instalacja podawania, obróbki radiacyjnej i odbioru wody balastowej:
 - zbiornik wejściowy (pomiar poziomu [%], pomiar temperatury [°C], pomiar pH),
 - pompa wejściowa (start, stop, sterowanie automatyczne, sterowanie ręczne),
 - pompa podająca (start, stop, sterowanie automatyczne, sterowanie ręczne, przepływ [l/min], ciśnienie),
 - komora reakcyjna (prędkość liniowa wody balastowej [m/min], temperatura [°C]),
 - pompa wyjściowa (start, stop, sterowanie automatyczne, sterowanie ręczne, przycisk awaryjny),
 - zbiornik wyjściowy (pomiar poziomu [%]),
 - zdalna kontrola zaworu trójdrożnego;
- c) wentylacja wyciągowa ozonu
 - pomiar wydajności [l/min],
 - pomiar temperatury [°C],
 - pomiar ciśnienia;
- d) wymiennik ciepła – uruchamianie (start, stop, pompa, wentylator, alarm);
- e) pomiar promieniowania jonizującego (zgodnie z wymaganiami BHP);
- f) zasilanie (start, stop, napięcie [V], prąd [A]).

Po przyjęciu ostatecznej konfiguracji pomieszczeń z uwzględnieniem takich elementów, jak czerpnia świeżego powietrza, wentylatory i komin odciągu ozonu, powinno zostać opracowane i zamieszczone w projekcie technicznym instalacji przeznaczonej do radiacyjnej obróbki wód balastowych szczegółowe rozwiązanie układu sterowania. Akceleratory elektronów są źródłem intensywnego promieniowania jonizującego. Niezbędne osłony biologiczne powinny zostać zaprojektowane i wykonane zgodnie z polskimi przepisami.

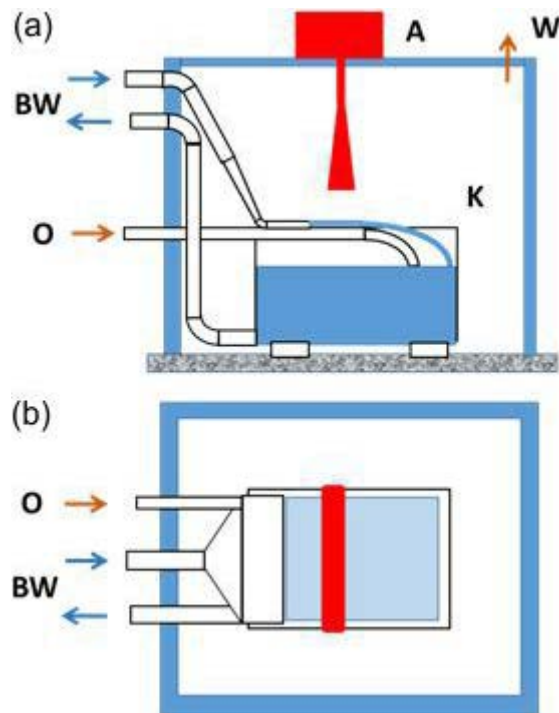
5.4. Opis wybranych elementów obiektu

W przedstawionej koncepcji węzła radiacyjnego do higienizacji wód balastowych wykorzystany zostanie akcelerator typu ELV-4 produkcji rosyjskiej, o energii wiązki elektronów 1 MeV, średnim prądzie 50 mA i mocy wiązki 50 kW.

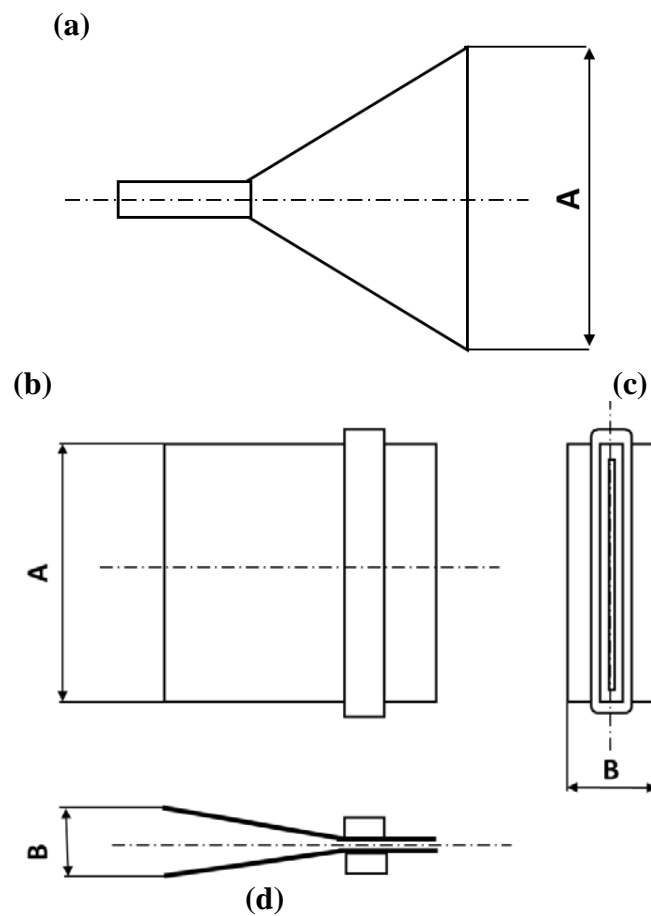
Wykonanie osłon z betonu zbrojonego o gęstości $2,4 \text{ g/cm}^3$ znacznie zwiększyłyby ich gabaryty. Korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie osłon z płyt wykonanych z żelaza i uzupełnionych w miejscach krytycznych osłonami z ołowiu. Wstępną koncepcję węzła radiacyjnego wraz z osłonami lokalnymi komory reakcyjnej i obudowy ciśnieniowej pokazano na rys. 22.

Umieszczenie lokalnych osłon przed promieniowaniem powoduje, że powstają dwa niezależne pomieszczenia. W części górnej (rys. 22a) osłaniana jest obudowa ciśnieniowa, w części dolnej (rys. 22b) – główne elementy: urządzenie wyprowadzenia wiązki przyspieszonych elektronów do atmosfery, komora reakcyjna, do której doprowadzane i z której odprowadzane są wody balastowe, instalacja doprowadzenia ozonu oraz wyciąg. Doprowadzenia i odprowadzenia wody balastowej na zewnątrz pomieszczenia poprowadzono górną, co może ułatwić ich ekranowanie z uwagi na promieniowanie jonizujące.

Na rys. 23 przedstawiono szkic elementów dyszy formującej strumień wody balastowej o określonych wymiarach geometrycznych (grubości warstwy, szerokości strumienia) i przystosowany do określonych parametrów wiązki elektronów (energii elektronów, szerokości przemieszczania). Dyszę formującą wykonano z blachy ze stali nierdzewnej o grubości 5 mm. Wysokość szczeliny jest określona przez energię elektronów i założoną dawkę średnią. Można przyjąć, że



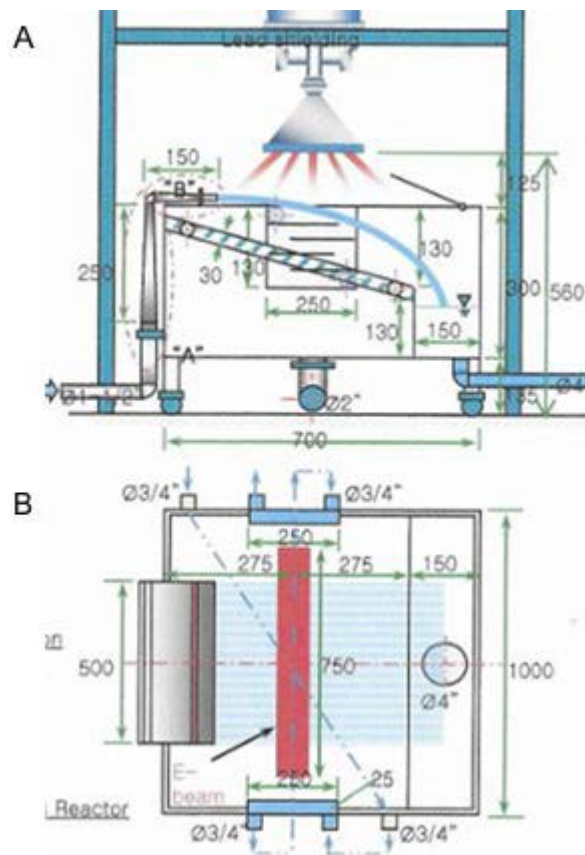
Rys. 22. Pomieszczenie wyprowadzenia wiązki węzła radiacyjnego do higienizacji wód balastowych: (a) rzut z boku, (b) rzut z góry; A – akcelerator, W – instalacja wyciągowa, K – komora reakcyjna, BW – wody balastowe, O – wlot ozonu.



Rys. 23. Szkic dyszy formującej strumień wody balastowej o określonych wymiarach geometrycznych: (a) widok z góry części stożkowej, (b) widok z frontu, (c) przekrój boczny, (d) widok z góry części płaskiej; A, B – wymiary gabarytowe dyszy.

dla energii 1 MeV wysokość szczeliny wynosi 3 mm. Przy zastosowaniu ozonowania lub napowietrzania wielkość ta może zwiększyć się do 4-5 mm.

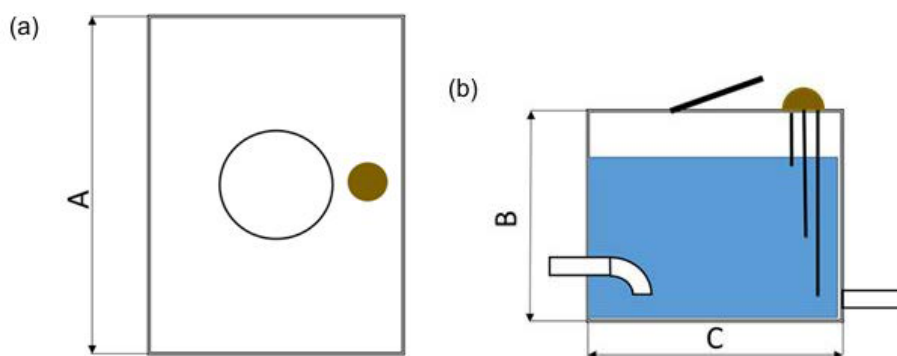
Widoczny na rys. 23a element zapewnia przejście między połączeniem rurowym a częścią płaską (rys. 23b), która z kolei zapewnia równoległość strumienia cieczy i jego odpowiednią wysokość (rys. 23c). Na rys. 23d widoczna jest opaska pierścieniowa, wzmacniająca konstrukcję i zapobiegająca deformacji szczeliny.



Rys. 24. Pomieszczenie wyprowadzenia wiązki w instalacji mobilnej [2]: A – rzut z boku, B – rzut z góry.

Na rys. 24 przedstawiono pomieszczenie wyprowadzenia wiązki w instalacji mobilnej zbudowanej w Korei [13, 14]. Odmiennie poprowadzono orurowanie dla wody balastowej. Widoczne na ścianach bocznych elementy chłodzone wodą mają wyeliminować efekty termiczne powodowane przez rozproszony strumień elektronów.

Gabaryty (A, B, C) zbiorników wyrównawczych (rys. 25) zależą od przyjętych założeń technologicznych. Zbiorniki powinny być wyposażone w czujniki położenia poziomu wód balastowych i temperatury.

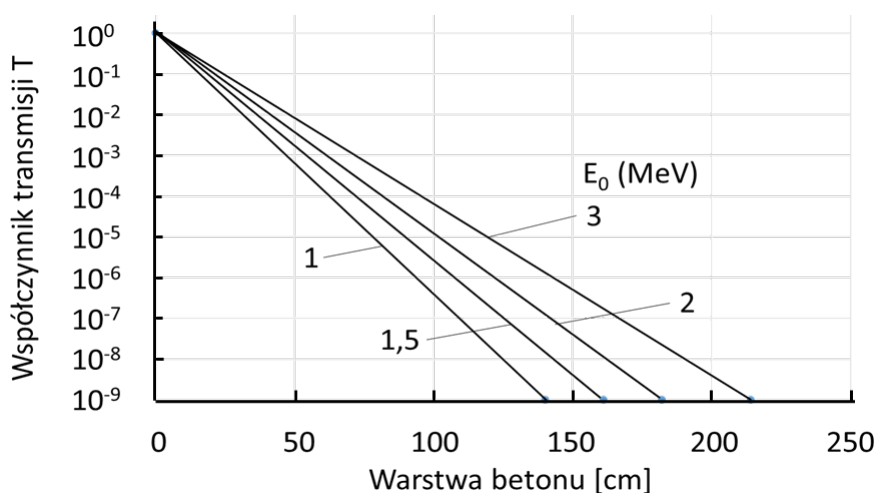


Rys. 25. Zbiorniki wyrównawcze na wejściu i wyjściu węzła radiacyjnego: (a) rzut z góry, (b) rzut z boku; A, B, C – gabaryty zbiornika.

6. WYMAGANIA DOTYCZĄCE INSTALACJI WYPOSAŻONEJ W AKCELERATOR

6.1. Osłony przed promieniowaniem jonizującym

Akceleratory elektronów są źródłem intensywnego promieniowania jonizującego. Niezbędne osłony biologiczne powinny być zaprojektowane i wykonane zgodnie z polskimi przepisami. W przedstawionej koncepcji węzła radiacyjnego do higienizacji wód balastowych przyjęto, że wykorzystany zostanie akcelerator typu ELV-4 produkcji rosyjskiej o energii wiązki elektronów 1 MeV, średnim prądzie 50 mA i mocy wiązki 50 kW. Przy braku wiązki, ale przy wysokim napięciu w sekcji przyspieszającej (na przykład w trybie trenowania sekcji przyspieszającej) możliwa jest emisja elektronów z górnych elektrod sekcji przyspieszającej, a tym samym elektronów przyspieszonych do energii określonej poziomem wysokiego napięcia. W takim przypadku maksymalny prąd wiązki elektronów w powietrzu wynosi nie więcej niż 20 μA , co stwarza realne zagrożenie dla personelu instalacji.

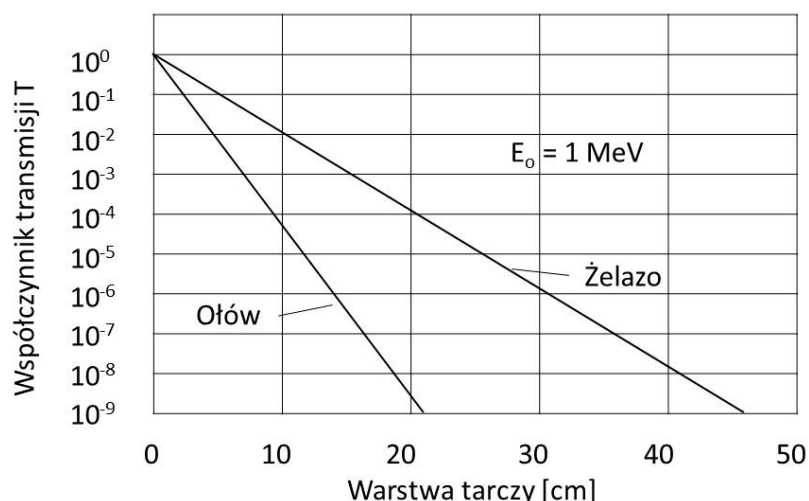


Rys. 26. Zależność współczynnika transmisji, T , promieniowania hamowania emitowanego z tarczy o wysokim Z od grubości osłony wykonanej z betonu dla wiązki elektronów o różnych energiach.

Na rys. 26 przedstawiono zależność współczynnika transmisji, T , promieniowania hamowania (inaczej promieniowanie X lub bremsstrahlung) emitowanego z tarczy o wysokim Z od grubości osłony wykonanej z betonu (gęstość $2,35 \text{ g/cm}^3$) w warunkach szerokiej wiązki przy zerowym kącie w stosunku do padającej wiązki elektronów. Oznaczenie energii E_0 dla każdej krzywej dotyczy wiązki monoenergetycznych elektronów padającej na tarczę.

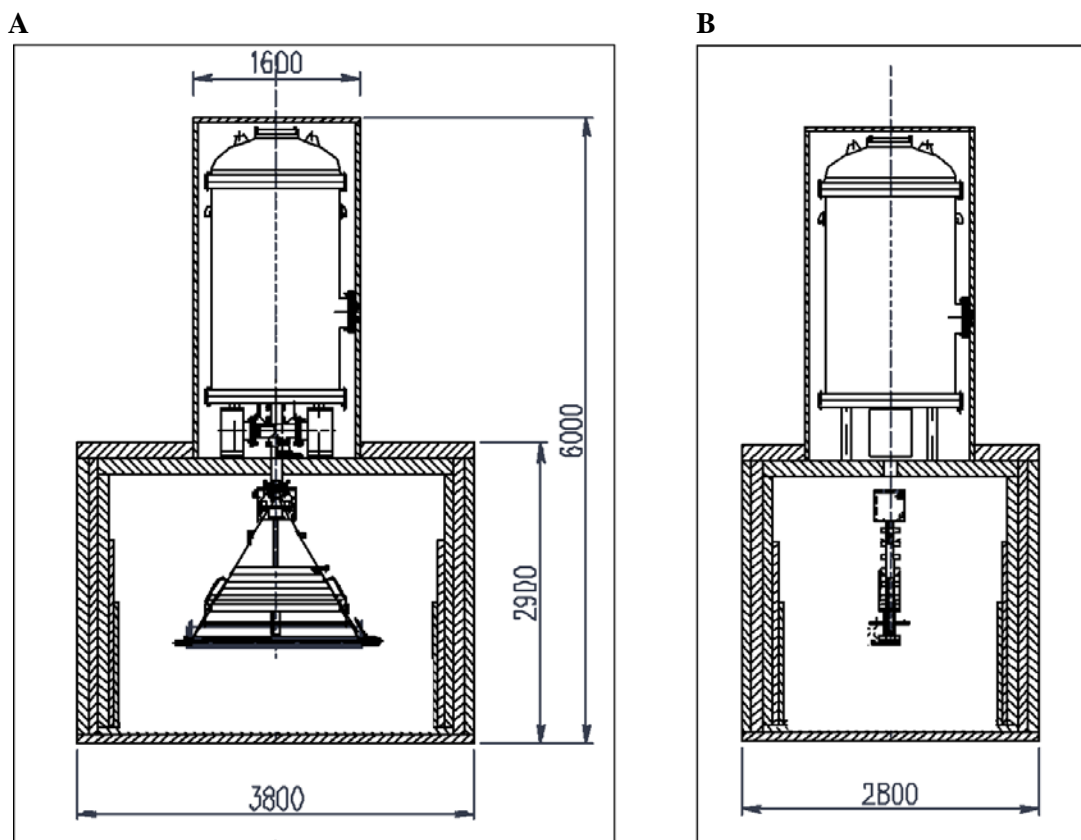
W procesie radiacyjnej higienizacji wód balastowych zostanie wykorzystana wiązka elektronów o energii 1 MeV. W wyniku oddziaływania obiektu poddawanego obróbce radiacyjnej i elementów konstrukcyjnych układu następuje całkowite pochłanianie wiązki elektronów. Czynnikiem stwarzającym zagrożenie jest promieniowanie hamowania, powstające w wyniku konwersji e/X w materiałach, do których dociera strumień elektronów. W przypadku betonowych osłon promieniowanie hamowania ma widmo ciągłe i maksymalną energię kwantów na poziomie 1 MeV oraz śladowe ilości promieniowania neutronowego (do zaniechania w przypadku osłon z betonu). Osłony komór akceleratorów będą więc osłonami przed promieniowaniem X .

Z rys. 26 i 27 wynika, że grubość osłon dla określonego współczynnika transmisji (osłabienia) promieniowania jonizującego w istotny sposób zależy od gęstości materiału osłony. Osłona z ołowiu (gęstość $11,35 \text{ g/cm}^3$) odpowiada nieco ponad dwa razy grubsza osłona z żelaza (gęstość $7,8 \text{ g/cm}^3$) i niemal siedem razy grubsza osłona z betonu (gęstość $2,35 \text{ g/cm}^3$). Osłona z najtańszego betonu zajmuje zbyt wiele miejsca, a z kolei osłona z ołowiu stanowi najdroższe rozwiązanie. W podobnych przypadkach najczęściej stosuje się osłony wykonane z żelaza, uzupełnione w krytycznych miejscach płytami z ołowiu.



Rys. 27. Zależność współczynnika transmisji, T , promieniowania hamowania emitowanego z tarczy o wysokim Z dla różnych materiałów na osłony przed promieniowaniem (ołów, żelazo) i dla wiązki elektronów o energii 1 MeV.

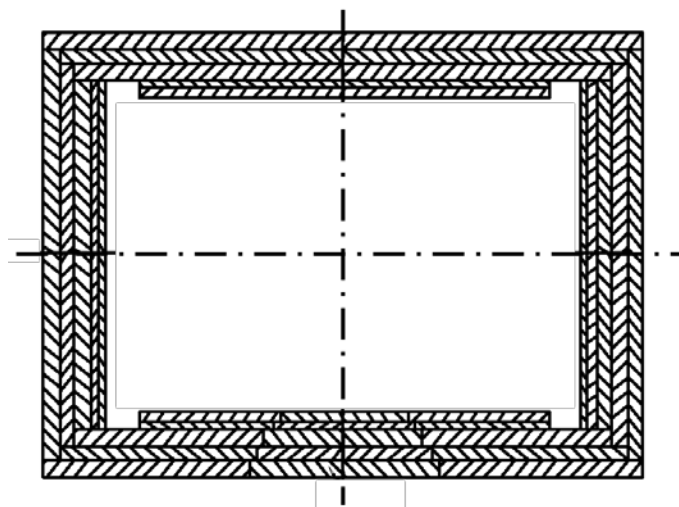
Zasadniczą tarczą emitującą promieniowanie X będzie warstwa wody balastowej o grubości $R_m = 0,3-0,4 \text{ cm}$ (grubość warstwy o określonej dawce średniej dla wiązki elektronów o energii 1 MeV) oraz konstrukcja wykonana ze stali nierdzewnej o grubości rzędu 5 mm. Strumień wód balastowych będzie formowany we wstęgi o użytecznej szerokości 0,8 m i przemieszczany nad płaszczyzną ze stali nierdzewnej z szybkością 2,5 m/s, a następnie zostanie poddany oddziaływaniu wiązki elektronów wyprowadzonych przez okno układu wyjściowego akceleratora. Ze względu na niejednorodność warstwy pochłaniającej przyspieszone elektrony



Rys. 28. Przykładowa konstrukcja osłon lokalnych wykonanych z płyt stalowych: A – rzut z przodu prostopadły do kierunku przemieszczania elektronów, B – rzut boczny zgodny z kierunkiem przemieszczania elektronów.

należy pesymistycznie przyjąć jako target umowny, emitujący wyższy poziom emisji promieniowania X, żelazo odpowiadające materiałom konstrukcyjnym, o liczbie atomowej ($Z = 26$). Kierunek wiązki będzie prostopadły do podłogi komory ($\vartheta = 0^\circ$). Źródło promieniowania X ma charakter źródła płaskiego pulsującego o wymiarach $80 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Warto zaznaczyć, że jeśli niższa kondygnacja instalacji, poniżej poziomu 0, będzie dostępna dla ludzi, to grubość osłon podłogowych będzie istotnie większa od grubości osłon bocznych.

Na rys. 28 zaprezentowano propozycję rozwiązania konstrukcji osłon lokalnych w węźle radiacyjnym do higienizacji wód balastowych, które wykonano z kilku warstw płyt stalowych. Na rys. 29 przedstawiono rzut z góry przekroju poprzecznego tych osłon. Istotne jest łączenie płyt na zakładkę dla poprawy własności osłonnych. Na jednej ze ścian bocznych widoczny jest zarys drzwi osłonowych niezbędnych do wykonywania prac montażowych i serwisowych. Ze względu na stosunkowo duży ciężar tych drzwi wymagany jest układ mechaniczny pozwalający na ich sprawne zamykanie i otwieranie.



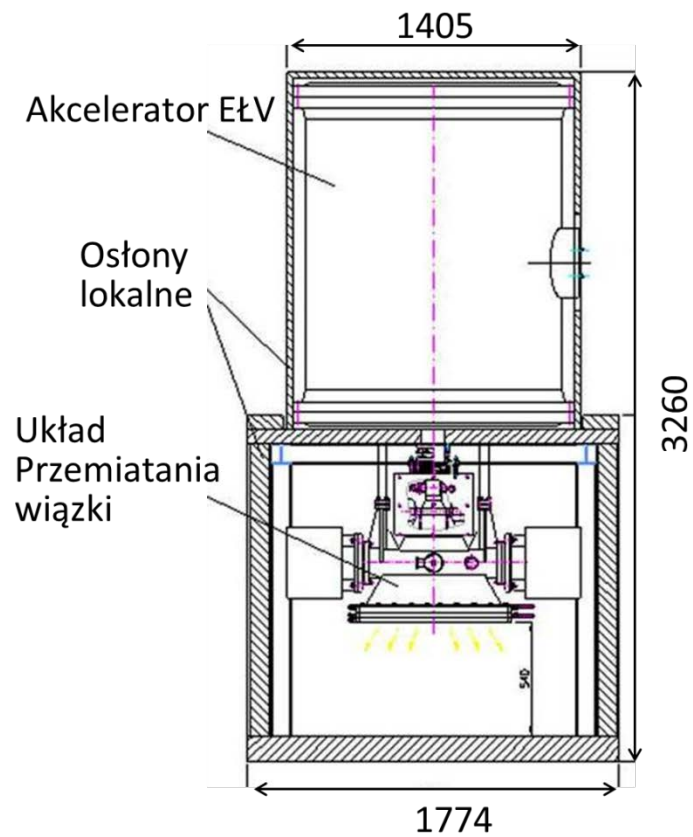
Rys. 29. Rzut z góry przekroju poprzecznego osłon.

Na rys 30 przedstawiono przekrój przez osłony przed promieniowaniem w instalacji mobilnej wyposażonej w akcelerator typu ELV o energii elektronów $0,4\text{-}0,65 \text{ MeV}$ i mocy wiązki 20 kW [13, 14]. Na uwagę zasługuje płaski kształt przykrywy obudowy ciśnieniowej zasilacza wysokiego napięcia oraz umieszczenie pomp próżniowych na poziomie układu przemieszczania wiązki, a nie bezpośrednio pod obudową ciśnieniową jak to ma miejsce w typowych rozwiązaniach. Dzięki temu znacznie ograniczono wysokość instalacji. Oczywiście na zmniejszenie wysokości obudowy ciśnieniowej ma też wpływ niższa energia elektronów.

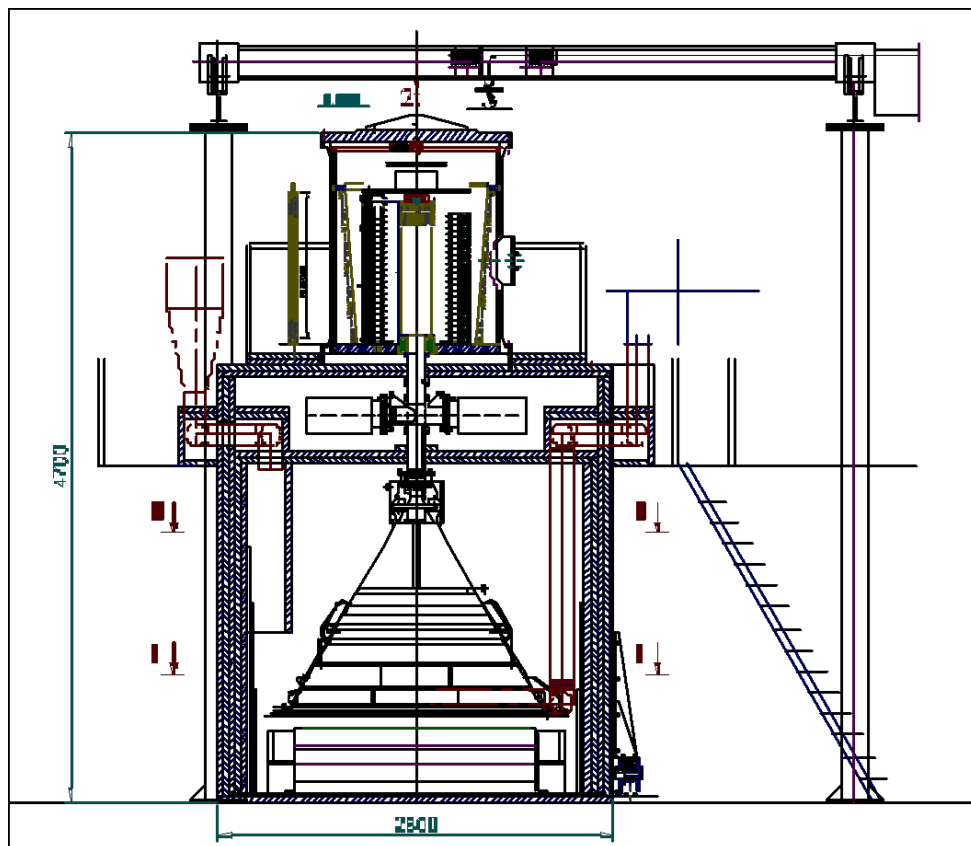
Dla prównania na rys. 31 przedstawiono schematycznie rozwiązanie osłon lokalnych w instalacji przeznaczonej do obróbki taśm termokurczliwych na bazie akceleratora o energii elektronów $0,5 \text{ MeV}$ i mocy wiązki 50 kW . Na uwagę zasługuje wykorzystanie labiryntowych przejść dla połączeń rurowych, widocznych w górnej części osłon (także rys. 32). Charakterystyczne jest zmniejszanie się grubości osłon w miarę oddalania od miejsca wyprowadzenia wiązki elektronów.

Ze względu na optymalizację grubości osłon należy dla umownej tarczy z żelaza określić wielkości mocy dawek [$\text{rad}\cdot\text{m}^2\cdot\text{mA}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] dla kierunków: $\vartheta = 0^\circ$, poniżej podłogi, $\vartheta = 90^\circ$, w którym są usytuowane ściany boczne i $\vartheta = 180^\circ$ dla stropu, przy średniej wielkości energii promieniowania 1 MeV i mocy wiązki 50 kW .

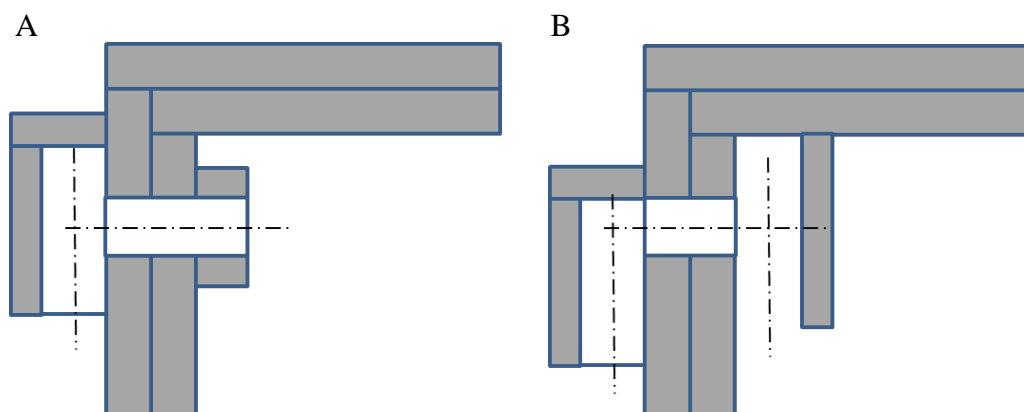
W przypadku zastosowania akceleratorów ELV-4 i posadowienia ich na stropie z żelaza trzeba będzie wykonać w nim otwór o średnicy 1300 mm , przez który będzie wychodziło w górę w kierunku stropu ($\vartheta = 180^\circ$) promieniowanie osłabione tylko przez niezbyt gruby płaszcz stalowy obudowy sekcji przyspieszającej i wewnętrzne miedziane cylindry prostownika wysokiego napięcia. Niekiedy producenci akceleratora wyposażają płaszcz stalowy obudowy ciśnieniowej w dodatkową osłonę z ołowiu.



Rys. 30. Przekrój przez instalację z akceleratorem typu ELV o energii 0,4-0,65 MeV i mocy wiązki 20 kW.



Rys. 31. Konstrukcja osłon lokalnych w instalacji z akceleratorem o energii 0,5 MeV i mocy wiązki 50 kW.



Rys. 32. Przykłady konstrukcji labiryntów wykorzystywanych do wprowadzenia i wyprowadzenia połączeń rurowych do pomieszczenia wyprowadzenia wiązki: A – labirynt typu „L”, B – labirynt typu „C”.

6.2. Ochrona radiologiczna

Charakterystyka promieniowania jonizującego

Akcelerator podłączony do zasilania jest źródłem niebezpiecznego promieniowania jonizującego. Zgodnie z polskimi i międzynarodowymi przepisami konieczne jest zatem wyposażenie instalacji w odpowiednią osłonę przed tym promieniowaniem. Istnieje możliwość uzyskania informacji niezbędnych do zaprojektowania osłon od producenta akceleratora lub wyspecjalizowanej firmy przygotowanej do wykonania odpowiednich obliczeń. Przyspieszone w akceleratorze elektrony w instalacji do radiacyjnej obróbki wód balastowych mają stosunkowo niski poziom energii. Na przykład elektrony przyspieszane do energii 1 MeV są zatrzymywane przez aluminiową płytę o grubości 2 mm. Jednak generowane przy tym promieniowanie hamowania jest znacznie bardziej przenikliwe i wymaga zastosowania osłon zabezpieczających personel przed narażeniem na szkodliwe skutki jego działania. Dlatego niezbędne jest ekranowanie przed oddziaływaniem promieniowania. Najczęściej stosuje się osłony z ołowiu, żelaza lub betonu. Przy budowaniu osłon znaczenie ma przede wszystkim koszt, łatwość budowy i konserwacji. Zasadniczo przy niskich energiach stosuje się ekranowanie ołowiem. Z uwagi na koszty lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie osłon betonowych.

Tabela 3. Dawki promieniowania jonizującego i ich jednostki.

Wielkość	Opis	Jednostki*
Dawka pochłonięta	Napromienianie dowolnego materiału średnia energia – średnia energia promieniowania pochłonięta przez jednostkę masy materiału, w którym rozchodzi się promieniowanie	grej, 1 Gy 1 Gy = 1 J/kg (rad, 1 rd) 1 rd = 1 cGy
Równoważnik dawki	Napromienianie żywego organizmu w określonym punkcie tkanki (uwzględnia wpływ rodzaju promieniowania)	siwert, 1 Sv (rem, 1 rem) 1 rem = 10 cGy

* W okrągłych nawiasach podano dawne jednostki.

Pochłanianie energii promieniowania jonizującego określane jest w poniższych jednostkach (tabela 3):

- 1 Gy – ilość energii 1 dżula pochłonięta przez 1 kilogram napromienianej materii. W starym układzie jednostek stosowano jednostkę rad, a 1 rad = 100 erg/g lub 1 rad = 0,01 Gy.
- 1 Sv – jednostkowa dawka promieniowania jonizującego, która daje taki sam biologiczny efekt jak 1 Gy. $Sv = Gy \times R.B.E.$

Względną skuteczność biologiczną (R.B.E. – relative biological effectiveness) dla różnych rodzajów promieniowania podano w tabeli 4.

Tabela 4. Względna skuteczność biologiczna dla różnych rodzajów promieniowania.

Rodzaj promieniowania jonizującego	R.B.E.
Promieniowanie hamowania i gamma	1
Przyspieszone elektrony, promieniowanie beta	1
Szybkie neutrony i protony o energii < 10 MeV	10
Promieniowanie alfa	20

Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (Dz. U. z 2019 r.) definiuje szereg parametrów, m.in. dawkę pochłoniętą, dawkę równoważną oraz dawkę skuteczną.

Dawka pochłonięta, D , jest to energia pochłonięta w jednostce masy, wyrażona wzorem:

$$D = dE/dm$$

gdzie: dE – średnia energia przekazana przez promieniowanie jonizujące materii w elemencie objętości, dm – masa materii w elemencie objętości.

Dawka pochłonięta oznacza dawkę uśrednioną w tkance lub narządzie. Jednostką dawki pochłoniętej jest grej (Gy). Jeden grej równa się jednemu dżulowi na kilogram: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Dawka równoważna, H_T , jest to dawka pochłonięta w tkance lub narządzie, T , ważona dla rodzaju i energii promieniowania, R , wyrażona wzorem:

$$H_T = w_R D_{T,R}$$

gdzie: $D_{T,R}$ – dawka pochłonięta promieniowania, R , uśredniona w tkance lub narządzie, T ; w_R – czynnik wagowy promieniowania, R .

Jednostką dawki równoważnej jest siwert (Sv). Jeden siwert równa się jednemu dżulowi na kilogram: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

Dawka skuteczna (efektywna), E , jest to suma ważonych dawek równoważnych od zewnętrznego i wewnętrznego napromienienia tkanek i narządów. Jednostką dawki skutecznej (efektywnej) jest siwert (Sv).

Dla pracowników dawka graniczna, wyrażona jako dawka skuteczna (efektywna), wynosi 20 mSv w ciągu roku kalendarzowego. W przypadku wyrażenia zgody, dawka o której mowa wyżej, może być w danym roku kalendarzowym przekroczona do wartości 50 mSv, o ile zgodę na takie przekroczenie wyda, ze względu na szczególne warunki lub okoliczności wykonywania działalności związanej z narażeniem, organ właściwy do wydania zezwolenia, przyjęcia zgłoszenia albo przyjęcia powiadomienia. Wtedy średnia roczna dawka skuteczna (efektywna) w każdym okresie pięciu kolejnych lat kalendarzowych, w tym lat, w których dawka graniczna została przekroczona, nie może przekroczyć 20 mSv.

Dawka graniczna, wyrażona jako dawka równoważna, wynosi w ciągu roku kalendarzowego: 20 mSv – dla soczewki oka; 500 mSv – dla skóry, jako wartość średnia dla każdego obszaru 1 cm^2 napromienionej części skóry, niezależnie od napromienionej powierzchni; 500 mSv – dla kończyn zdefiniowanych jako dłonie, przedramiona, stopy i kostki. Wartość ta może być w pojedynczym roku kalendarzowym przekroczona do 50 mSv, jednakże w każdym okresie pięciu kolejnych lat kalendarzowych, w tym lat, w których dawka graniczna została przekroczona, nie może przekroczyć 100 mSv.

Dla osób z ogółu ludności dawka graniczna, wyrażona jako dawka skuteczna (efektywna), wynosi 1 mSv w ciągu roku kalendarzowego, przy czym dawka graniczna, wyrażona jako dawka równoważna, wynosi w ciągu roku kalendarzowego: 15 mSv – dla soczewki oka; 50 mSv – dla skóry, jako wartość średnia dla każdego obszaru 1 cm^2 napromienionej części skóry, niezależnie od napromienionej powierzchni.

Przy projektowaniu struktur osłonnych, zewnętrzne powierzchnie danej struktury są określone jako granice z kontrolowanym obszarem. To znaczy struktura osłonna czy sklepienie są

tak zaprojektowane, aby przenikanie promieniowania hamowania nie przekraczało określonych prawem atomowym poziomów przy zadanym czasie funkcjonowania instalacji.

Ochrona przed promieniowaniem

Pod kątem ochrony przed promieniowaniem rozpatruje się trzy poniższe elementy:

- odległość od źródła promieniowania,
- czas ekspozycji,
- skuteczność osłon.

Odpowiednie połączenie tych trzech elementów zapewnia uzyskanie wymaganego stopnia ochrony przed promieniowaniem jonizującym.

Intensywność promieniowania jonizującego zmniejsza się wraz z odległością od źródła. Dla promieniowania hamowania lub gamma przyjmuje się w praktyce, że intensywność jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od źródła.

Jeśli osoby obsługujące instalację nie są normalnie obecne w danym pomieszczeniu podczas pracy instalacji obróbki radiacyjnej, to pomieszczenie to można sklasyfikować jako tymczasowo zajmowane lub mniej eksploatowane (tabela 5, ale w żadnym wypadku współczynnik zajętości nie może być mniejszy od 1/16).

Tabela 5. Współczynnik zajętości związany z wykorzystaniem pomieszczeń.

Pełna zajętość $T = 1$	Kontrolowane obszary biura: pokój opieki, korytarze, duża poczekalnia ze stolikami, warsztaty, toaleta, pokój wypoczynkowy wykorzystywany codziennie przez obsługę instalacji, pomieszczenia mieszkalne, plac zabaw, obszary mieszkalne w sąsiadującym budynku.
Częściowa zajętość $T = 1/4$	Wąskie korytarze (zbyt wąskie dla postawienia biurka), pokój wypoczynkowy wykorzystywany w ograniczonym zakresie, windy, parkingi.
Czasowa zajętość $T = 1/16$	Magazyny zbyt małe, aby zamienić je w mieszkanie; toaleta nieużywana przez personel; klatki schodowe; automatyczne windy; ścieżki; drogi.

6.3. Wentylacja i warunki klimatyczne

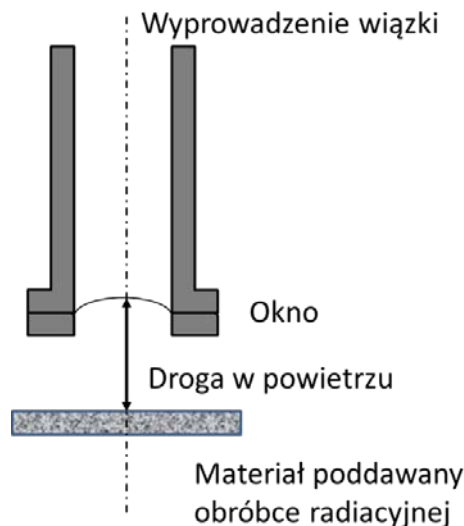
Należy określić wymagania dotyczące wentylacji poszczególnych pomieszczeń, w których zainstalowany będzie węzeł radiacyjny. W trakcie pracy akceleratorów z wiązką przyspieszonych elektronów są emitowane w znacznych ilościach szkodliwe dla zdrowia gazy, takie jak ozon i tlenki azotu. Wykorzystywany w zasilaczu akceleratora gaz izolacyjny SF_6 nie jest toksyczny, ale poddany wyładowaniom elektrycznym takim się staje. Gaz SF_6 należy do grupy gazów cieplarnianych i dlatego wymaga instalacji zamkniętej. W trakcie pracy akceleratora musi funkcjonować specjalna wentylacja, która będzie usuwać szkodliwe gazy (ozon, tlenki azotu) poza obręb budynku. Niezbędne obliczenia i projekt instalacji powinien zostać wykonany zgodnie z obowiązującymi przepisami. W pomieszczeniach, w których przebywa personel, obowiązują ścisłe rygory dotyczące stężenia ozonu i tlenków azotu. W pomieszczeniach gdzie zainstalowana jest aparatura, należy określić jaka część wydzielanej mocy powinna być usuwana przy wykorzystaniu systemu wentylacji.

Temperatura otoczenia urządzeń wchodzących w skład akceleratora powinna mieścić się w zakresie od 0 do 40°C, a wilgotność względna powinna być poniżej 80%. Panel kontrolny wyposażony w układ sterowania powinien znaleźć się w klimatyzowanym pomieszczeniu. Podczas transportu i przechowywania elementów akceleratora powinny być przestrzegane ograniczenia temperaturowe określone przez producenta urządzeń.

Układ wentylacji wyciągowej ozonu

Jeden z istotnych problemów w przypadku instalacji radiacyjnych stanowi poziom ozonu generowanego w trakcie jej pracy. Ozon wyczuwalny jest już przy koncentracji 0,01 ppm, ale

jego szkodliwy wpływ ujawnia się przy koncentracji powyżej 1 ppm. Na przykład norma amerykańska określa dzienne narażenie na ozon przy ośmiogodzinnym dniu pracy na 0,1 ppm. W niektórych krajach poziom ten wynosi 0,06 ppm, a nawet mniej. Poziom dopuszczalnej koncentracji ozonu w Polsce wynosi $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, co stanowi maksymalną średnią ośmiogodzinną krocząca obliczoną ze średnich jednogodzinnych w ciągu doby. Odpowiada to koncentracji ozonu na poziomie 0,056 ppm.



Rys. 33. Warunki generacji ozonu pod wpływem wiązki elektronów.

Ilość generowanego ozonu wynosi $0,11 \text{ kg}/\text{kWh}$ i zależy od energii elektronów, prądu wiązki i długości drogi w powietrzu (rys. 33). Wydajność procesu generacji ozonu można określić zależnością:

$$Q = 0,11 \times W$$

gdzie W [kW] określa straty energii w jednostce czasu w powietrzu.

Przyjęto następujące parametry głowicy przyspieszającej:

- energia elektronów, E : 1000 keV;
- prąd wiązki, I : 50 mA;
- dystans między oknem a powierzchnią osadu, d : 20 cm;
- współczynnik pochłaniania energii, F : $1,68 \text{ MeV}/\text{g}/\text{cm}^3$ dla elektronów o energii 1000 keV;
- gęstość powietrza, m : $1,293 \cdot 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$ w temperaturze 0°C .

Uwzględniając ww. parametry obliczono:

- zdolność hamowania:

$$F \times m = 1,68 \times 1,293 = 2,17 \cdot 10^{-3} \text{ MeV}/\text{cm}$$

- stratę energii:

$$\Delta E = 2,17 \cdot 10^{-3} \times d = 2,17 \cdot 10^{-3} \times 20 = 43,4 \text{ kV}$$

gdzie d oznacza drogę, którą wiązka przebywa w powietrzu [cm];

- stratę mocy:

$$\Delta W = \Delta E \times I = 43,44 \times 50 = 2,17 \text{ kW}$$

gdzie I oznacza prąd wiązki [mA].

W wyżej określonych warunkach wydajność generacji ozonu wynosi:

$$Q = 0,11 \text{ kg}/\text{kWh} \times \Delta W = 0,11 \times 2,17 = 0,239 \text{ kg}/\text{h} = 4 \text{ g}/\text{min}$$

Koncentrację ozonu w stanie równowagi można wyliczyć korzystając z zależności:

$$C_e = Q/(KD) \text{ [ppm]}$$

gdzie: K – wydajność układu wentylacji wyciągowej [Nm^3/min], D – stężenie ozonu [g/m^3], Q – wydajność generacji ozonu [g/min].

Czas, po którym dopuszcza się wejście do pomieszczenia z zainstalowanymi głowicami przyspieszającymi można określić zależnością:

$$t = (V/K) \ln(C_i/C_e)$$

gdzie: V – objętość pomieszczenia [m^3], C_t – koncentracja ozonu dopuszczalna w momencie wejścia [ppm] (dla uproszczenia przyjmuje się wielkość tego współczynnika jednakową dla całego pomieszczenia).

Wartość obliczonej koncentracji ozonu jednoznacznie określa wymogi dla zaprojektowania sprawnej instalacji wyciągowej. Dodatkowym problemem jest zneutralizowanie ozonu. W tym celu wykorzystuje się:

- spalanie (rozkład termiczny w temperaturze $450^{\circ}C$),
- aktywowany węgiel w postaci zgranulowanej z odpowiednimi dodatkami,
- dwutlenek magnezu,
- komin rozpraszający.

W celu obliczenia wysokości komina rozpraszającego nad powierzchnią ziemi można skorzystać z zależności:

$$H = \{(0,23 \times Q \times 10^6)/(U \times C_d) \times N\}$$

gdzie: H – wymagana wysokość komina [m], Q – wydajność generacji ozonu ($1 \text{ g/min} = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$), U – średnia szybkość wiatru (przyjęto 1 m/s), C_d – dopuszczalna koncentracja ozonu (przyjęto $0,05 \text{ ppm}$), N – współczynnik rozpraszania (przyjęto 1).

Układ wentylacji nawiewnej

Jedną z istotnych cech instalacji nawiewnej jest określony bilans powietrza w pomieszczeniu, w którym zainstalowano komory reakcyjne i głowice przyspieszające. Nawiew powietrza powinien być na takim poziomie, aby ciśnienie w pomieszczeniu z wyprowadzeniem wiązki było niższe od ciśnienia w sąsiednich pomieszczeniach. Zapobiega to wydostawaniu się ozonu poza pomieszczenie z zainstalowanymi akceleratorami.

Instalacja wentylacyjna wyciągowo-nawiewna w innych pomieszczeniach, w których pracują urządzenia wchodzące w skład akceleratorów, powinna uwzględniać bilans mocy traconej w tych urządzeniach.

6.4. Wytyczne do instrukcji BHP

Zgodnie z przepisami BHP akceleratorzy elektronów są urządzeniami o zwiększonym zagrożeniu. Montaż i eksploatacja akceleratorów powinny przebiegać zgodnie z ogólnymi zasadami dotyczącymi działania, eksploatacji technicznej i bezpieczeństwa obsługi urządzeń elektrycznych w zakładach przemysłowych, a także zgodnie z zasadami pracy ze źródłami promieniowania jonizującego.

Podczas pracy akceleratorów personel obsługujący może być narażony na:

- występowanie napięć zmiennych trójfazowych 380 V na częściach przewodzących prąd w poszczególnych urządzeniach wchodzących w skład akceleratora;
- występowanie wysokiego napięcia stałego (6 kV) w zasilaczach pomp tytanowych, w przewodach łączących i na złączach wysokonapięciowych pomp;
- powstanie ognisk pożaru w wyniku przebiegów elektrycznych urządzeń wysokonapięciowych;
- działanie wysokiego napięcia spowodowane wyciekiem wody chłodzącej;
- przedostanie się ozonu i tlenków azotu do pomieszczeń, gdzie przebywa obsługa akceleratora, spowodowane niesprawnie działającą wentylacją;
- przenikanie promieniowania hamowania ze strefy napromieniania do sąsiednich pomieszczeń spowodowane niesprawnością osłony radiologicznej.

Aby zapobiec zagrożeniu i wyeliminować wpływ szkodliwych czynników, personel obsługujący akcelerator powinien:

- zostać zaznajomiony z rodzajami zagrożeń i stopniem ich szkodliwości,
- znać budowę urządzenia, rozmieszczenie oraz przeznaczenie obwodów sterowania i sygnalizacji,
- dbać o sprawność techniczną środków zabezpieczających i blokad,
- nosić zawsze przy sobie indywidualne środki kontroli dozymetrycznej,
- dbać o sprawność techniczną sprzętu gaśniczego.

Bezpieczną eksploatację akceleratora zapewnia się poprzez:

- zastosowanie osłony radiologicznej strefy akceleratorów i sąsiadujących z nim pomieszczeń, wykonanej zgodnie z projektem osłon radiologicznych i normami projektowymi;
- zastosowanie blokad drzwiowych w systemie sterowania akceleratora;
- zastosowanie blokady mechanicznej uniemożliwiającej włączenie akceleratora przy otwartych drzwiach do pomieszczeń akceleratorów;
- widoczną przerwę w obwodzie urządzenia załączającego zasilanie urządzeń;
- zastosowanie ogólnego stycznika pozwalającego całkowicie przerwać obwód zasilania akceleratora;
- zastosowanie sygnalizacji świetlnej i dźwiękowej zagrożenia radiacyjnego;
- zastosowanie przełączników awaryjnego odłączenia akceleratorów w pomieszczeniach z zagrożeniem radiacyjnym;
- przeprowadzanie wszystkich prac montażowych i remontowych zgodnie z zasadami eksploatacji technicznej ZTE i zasadami BHP w czasie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych odbiorczych;
- przestrzeganie kolejności włączania i wyłączania akceleratorów oraz wykonywanie tych czynności zgodnie z dokumentacją techniczną urządzeń;
- wyposażenie urządzeń w środki zabezpieczające: drążki izolacyjne, rękawice dielektryczne, dywaniki dielektryczne i inne, zgodnie z zasadami BHP;
- przeprowadzanie wszystkich prac (trenowanie, włączanie, naprawa, przegląd profilaktyczny) przy urządzeniach przez dwie osoby, z których jedna posiada grupę BHP przewidzianą dla prowadzenia prac powyżej napięcia 1000 V.

Podczas pracy akceleratorów z wiązką przyspieszonych elektronów mogą mieć miejsce takie sytuacje awaryjne, jak:

- uszkodzenie blokady drzwiowej w pomieszczeniu do napromieniania,
- naruszenie osłony biologicznej,
- pożar urządzeń elektrycznych pod napięciem.

W przypadku zaistnienia jakiegokolwiek sytuacji awaryjnej należy całkowicie wyłączyć urządzenia, przerwać pracę przy akceleratorach i uniemożliwić dostęp ludzi do strefy zagrożenia, zawiadomić miejscową służbę ppoż, służbę dozymetryczną oraz władze administracyjne jednostki. Ponownie można włączyć akcelerator po wyjaśnieniu przyczyn awarii i usunięciu jej skutków oraz po uzyskaniu zgody służb ppoż i dozymetrycznej.

6.5. Wytyczne do ochrony przeciwkorozyjnej

W pomieszczeniu służącym do napromieniania wód balastowych należy oczekiwać wysokiego tła promieniowania jonizującego. W trakcie pracy urządzeń pomieszczenie to jest niedostępne dla obsługi, co ma zapewnić m.in. odpowiednio zaprojektowany system kontroli i sygnalizacji. Zainstalowane tam kamery TV powinny być wyposażone w osłony przed promieniowaniem, a w przedniej części – w osłony ze szkła ołowianego.

Przy doborze materiałów użytych do konstrukcji urządzeń w pomieszczeniu, gdzie wprowadzana jest wiązka elektronów, powinno uwzględniać się działanie korozyjne atmosfery w tym pomieszczeniu. Przyczyną tego stanu jest obecność ozonu i tlenków azotu. Pożądane jest wykonanie ze stali nierdzewnej komory reakcyjnej i trudno dostępnych elementów rurociągów. Pozostałe odcinki powinny mieć zabezpieczenie antykorozyjne. W pomieszczeniu do napromieniania należy wykluczyć stosowanie elementów wykonanych z miedzi, mosiądzu i innych stopów zawierających miedź. Zaleca się stosowanie epoksydowych pokryć lakierniczych odpornych na kwasy.

Instalacje chłodzenia wodnego w pomieszczeniu z komorami reakcyjnymi powinny być wykonane ze stali nierdzewnej. Dla instalacji nawiewnej i wyciągowej zaleca się stosowanie stali nierdzewnej lub odpornego na korozję aluminium oraz dopuszcza stosowanie elementów wykonanych ze zwykłej stali z epoksydowymi pokryciami antykorozyjnymi.

6.6. Zatrudnienie oraz zagadnienia socjalne i sanitarne

Praca instalacji przeznaczonej do obróbki radiacyjnej wód balastowych odbywać się będzie na jedną zmianę. Akceleratory dla potrzeb odkażania będą pracować 7 godzin dziennie. W celu realizacji założonego programu zatrudnione będą 3 osoby: pracownik nadzoru z kwalifikacjami dozymetrysty dla procesów przemysłowych i dwóch pracowników inżynieryjno-technicznych (obsługa akceleratora).

Przyjęto następujący podział funkcji podczas uruchamiania instalacji: kierownik i dwóch uprawnionych operatorów akceleratorów.

Dla trzech pracowników (mężczyzn) zatrudnionych przy obsłudze instalacji należy w fazie projektu technicznego przewidzieć dostęp do szatni z szafkami (podwójnymi) na wierzchnie okrycia i fartuchy ochronne oraz umywalką i „awaryjnym” natryskiem.

Należy przewidzieć też dostęp do pokoju śniadań z umywalką, zlewozmywakiem, lodówka i szafką do przechowania własnych posiłków oraz dostęp do w.c. (1 miska kompaktowa, 1 pisuar i 1 umywalka).

6.7. Instalacje pomocnicze

Instalacje wody technologicznej

Instalacja wody technologicznej potrzebna jest do chłodzenia akceleratora i zasilacza. Powinna ona odpowiadać parametrom czystości i oporności zgodnie z zapisami w kontrakcie na dostawę akceleratora. Ciśnienie wody na wejściu ma wynosić 4÷6 atm, a na wypływie – 1 atm.

Instalacja ma mieć obieg zamknięty i zewnętrzną chłodnię zapewniającą dostarczanie wody o temperaturze nie przekraczającej +30°C.

Przewidywane zużycie wody to 120 l/min dla jednego akceleratora i 17 l/min dla jednego zasilacza.

Instalacja wody zimnej i ciepłej oraz odpowiednia instalacja ścieków

Należy przewidzieć instalacje zimnej wody do celów konsumpcyjnych i sanitarnych, uwzględniając cele porządkowe, zwłaszcza okresowe mycie komór reakcyjnych.

Instalacja sprężonego powietrza

Akcelerator jest wyposażony w odpowiednią sprężarkę, która zapewnia nadmuch powietrza bez oleju i wody o ciśnieniu 3÷6 atm, temperaturze nie większej niż 30°C i w ilości nie mniejszej niż 3,5 m³/h. Do celów montażowo-instalacyjnych zostanie zastosowana mała sprężarka przewoźna.

Wentylacja komór napromieniania, pomieszczenia zasilaczy i sterowni

Wentylacja komór napromieniania i pozostałych pomieszczeń węzła obróbki radiacyjnej wód balastowych powinna być zgodna z polskimi normami. Zgodnie z normami w pomieszczeniach tych powinna być zainstalowana wentylacja nawiewno-wyciągowa zapewniająca 10-krotną wymianę na godzinę, przy czym odciąg powietrza z komory powinien być odpowiednio większy. Należy również zapewnić gradient różnicy ciśnień, to znaczy największe podciśnienie powinno panować w komorach napromieniania, a odpowiednio mniejsze w pozostałych pomieszczeniach. Ponadto sposób poprowadzenia instalacji wentylacji powinien zapewnić dobre wietrzenie pomieszczeń. Kratki nawiewu powinny być umieszczone na dole, a kratki odciągów – po przekątnej u góry.

W komorach napromieniania w pobliżu tubusu należy zainstalować kratki odciągu ozonu. Proponuje się umieścić kratki z obu stron komory, 5 cm nad podłogą. Przewody instalacyjne mają być wykonane z aluminium lub stali nierdzewnej.

Wentylacje pomieszczenia zasilaczy należy zaprojektować odpowiednio do zysków ciepła i zgodnie z polskimi normami.

Należy przewidzieć klimatyzację dla sterowni i pomieszczenia do prowadzenia pomiarów dozymetrycznych, zgodnie z normami. Należy też przewidzieć odpowiednie śluzy od strony przedsiionka i podwójne drzwi od strony zasilaczy (również ze względów akustycznych).

Zasilanie instalacji

Instalacja do obróbki radiacyjnej wód balastowych będzie zasilana osobną linią energetyczną z transformatorem separującym o mocy nie mniejszej niż 400 kVA, wtórnym napięciu $3 \times 380/220$ V i częstotliwości 50(60) Hz.

Linie zasilające akceleratory i zasilacze z rozdzielni NN w instalacji to:

- linia napięcia: trójfazowe 3×380 V, połączenie pięcioletowe: $3 \times$ faza+zero+ziemia o mocy 360 kW;
- linia napięcia: jednofazowe 220 V, połączenie czterożyłowe: $1 \times$ faza+zero+ziemia.

Instalacje dodatkowe

Projektowany obiekt powinien być wyposażony w instalacje:

- uziemienia,
- telefoniczną,
- głośno mówiącą,
- TV przemysłowej,
- sygnalizacji i alarmu ppoż. z czujkami dymu niejonizacyjnymi,
- sygnalizacji i blokad drzwi osłonowych.

Instalacja sterowania procesem technologicznym

Układ sterowania, blokad i sygnalizacji jest projektowany dla dwóch podstawowych grup urządzeń: jednej – umożliwiającej sterowanie pracą akceleratora oraz drugiej – zespołu urządzeń technologicznych procesu radiacyjnej obróbki wód balastowych. Dla obydwu grup urządzeń należy zapewnić zasilanie oraz lokalizację w odpowiedniej rozdzielni.

Instalację sterowania komputerowego akceleratora (mikroprocesor) dostarcza producent. Bezpieczną pracę i obsługę akceleratora zapewnia układ sterowania, sygnalizacji i blokad, który spełnia następujące wymagania:

- Steruje procesem otwierania drzwi osłonowych do strefy występowania promieniowania jonizującego, a otwarcie drzwi jest możliwe przy wyłączonych obwodach zasilania akceleratora (brak promieniowania jonizującego).
- Załączenie wiązki jest możliwe po zamknięciu drzwi osłonowych. Przed załączeniem wysyłane są do poszczególnych pomieszczeń sygnały akustyczny i świetlny uprzedzające o mającym nastąpić uruchomieniu akceleratora oraz aktywowaniu wszystkich przycisków stopu awaryjnego, działających nieprzerwanie przez określony czas. Przerwanie tego procesu wymaga powtórzenia całej operacji.
- Wciśnięcie któregośkolwiek przycisku awaryjnego powoduje natychmiastowe wyłączenie akceleratora oraz wycofanie przyzwolenia na prowadzenie procesu obróbki radiacyjnej.
- Uruchomienie akceleratora powinno nastąpić tylko wtedy, gdy nie ma personelu w strefie objętej działaniem promieniowania jonizującego.

Układ sterowania, sygnalizacji i blokad obejmuje także działanie urządzeń pomocniczych (wentylacja, chłodzenie, próżnia). Projekt, montaż i uruchomienie układu sterowania, kontroli i blokad urządzeń technologicznych zapewnia użytkownik instalacji. Instalacja powinna umożliwiać pomiar kluczowych parametrów procesu, takich jak wielkość przepływu wody balastowej poddawanej obróbce radiacyjnej czy wielkość strumienia napowietrzania (ozonowania).

7. PODSUMOWANIE

W ocenie opłacalności zastosowania metody radiacyjnej w procesie higienizacji wód balastowych należy uwzględnić dodatkowe efekty, takie jak eliminacja zagrożeń ekologicznych oraz możliwa do osiągnięcia duża wydajność instalacji. Wady metody radiacyjnej to stosunkowo wysokie koszty inwestycyjne i konieczność stosowania skomplikowanych urządzeń technicznych wymagających wykwalifikowanej obsługi. Wzrost wymagań w zakresie ochrony środowiska oraz wprowadzanie i egzekwowanie przepisów w tym zakresie prowadzi do intensyfikacji działań związanych z budową urządzeń przeznaczonych do oczyszczania wód balastowych.

Istotnym zagadnieniem związanym z wodami balastowymi jest obecność flory bakteryjnej, a szczególnie bakterii chorobotwórczych, a także pasożytów i wirusów. Zasadniczym powodem wprowadzenia techniki radiacyjnej do higienizacji jest biobójcze działanie wiązki przyspieszonych elektronów, znacząca eliminacja przykrych zapachów oraz rozkład chemicznych substancji toksycznych.

Wyniki porównania skuteczności procesu higienizacji wód balastowych pozwalają ocenić skuteczny, niezbędny dla obniżenia skażenia patogenami poziom dawki promieniowania.

Praca sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Sektorowego INNOship – projekt nr POIR.01.02.00-00 - 0007/18 „Zaprojektowanie i pilotażowa weryfikacja ekologicznego, zintegrowanego z pływającym dokiem, systemu zbierania i oczyszczania wód balastowych i szlamów ze statku oraz wody technologicznej z procesu czyszczenia kadłuba statku, z wykorzystaniem promieniowania jonizującego do usuwania zanieczyszczeń”. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

8. LITERATURA

- [1]. Barańska, M. (2016). Zarządzanie wodami balastowymi w świetle wymogów międzynarodowej konwencji o kontroli i postępowaniu ze statkowymi wodami balastowymi i osadami (BWM Convention). *Bezpieczeństwo i Ekologia*, 12/2016, 43-47.
- [2]. Kurucz, C.N., Waite, T.D., Cooper, W.J. i Nickelson, M.J. (1991). High energy electron irradiation of water, wastewater and sludge. W J. Lewins, M. Becker (Eds.), *Advances in Nuclear Science and Technology* (vol. 22, s. 1-43). Springer.
- [3]. Kuruch, Ch.N., Waite, T.D. i Cooper, W.J. (1995). The Miami Electron Beam Research Facility: a large scale wastewater treatment application. *Radiat. Phys. Chem.*, 45, 2, 299-307.
- [4]. Pikaev, A.K., Podzorova, E.A. i Bakhtin, O.M. (1997). Combined electron-beam and ozone treatment of wastewater in aerosol flow. *Radiat. Phys. Chem.*, 49, 1, 155-157.
- [5]. Han, B., Ko, J. Kim, J., Kim, Y., Chung, W., Makarov, I.E., Ponomariew, A.V. i Pikajew, A.K. (2002). Combined electron-beam and biological treatment of dyeing complex wastewater. Pilot plant experiments. *Radiat. Phys. Chem.*, 64, 1, 53-59.
- [6]. Sampa, M.H.O., Borrelly, S.I., Silva, B.L., Vieira, J.M., Rela, P.R., Calvo, W.A.P., Nieto, R.C., Duarte, C.L., Perez, H.E.B., Somessari, E.S. i Lugão, A.B. (1995). The use of electron beam accelerator for the treatment of drinking water and wastewater in Brazil. *Radiat. Phys. Chem.*, 46, 4-6, Part 2, 1143-1146.
- [7]. Rela, P.R., Sampa, M.H.O., Duarte, C.L., Costa, F.E. i Sciani, V. (2000). Development of an up-flow irradiation device for electron beam wastewater treatment. *Radiat. Phys. Chem.*, 57, 3-6, 657-660.
- [8]. Han, B., Kim, J., Kim, Y., Choi, J.S., Makarov, I.E. i Ponomariev, A.V. (2005). Electron beam treatment of textile dyeing wastewater: operation of pilot plant and industrial plant construction. *Water Sci. Technol.*, 52, 317-324.
- [9]. Bryl-Sandalewska, T., Kaźmierczuk, M. i Królikowski, A. (1986). Wpływ napromieniowania na zmianę właściwości osadów ściekowych. *Biuletyn Instytutu Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej*, 7-8, 96-107.
- [10]. Chmielewski, A.G., Zimek, Z., Bryl-Sandalewska, T., Kubera, T., Kalisz, L. i Kaźmierczuk, M. (1995). Disinfection of municipal sewage sludge in installation equipped with electron accelerator. *Radiat. Phys. Chem.*, 46, 4-6, 1071-1074.
- [11]. Zimek, Z., Roman, K. i Długoń, S. (2016). *Laboratoryjna instalacja do ciągłej obróbki radiacyjnej ciekłych zanieczyszczeń przemysłowych*. Warszawa: Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. Raporty IChTJ, seria B nr 1/2016.

- [12]. Gehringer, P., Proksch, E., Eschweiler, H. i Szinovatz, W. (1992). Remediation of groundwater polluted with chlorinated ethylenes by ozone-electron beam treatment. *Appl. Radiat. Isot.*, 43, 9, 1107-1115.
- [13]. Kang, W.G., Kuk, S.H., Kim, J.K., Han, B. i Kang, C.M. (2009). Shielding design of a mobile electron accelerator using Monte Carlo technique. *J. Radiat. Ind.*, 3, 79-85.
- [14]. Han, B., Kim, S.M., Kang, W.G., Kim, J.K., Kuksanov, N.K. i Salimov, R.A. (2016). Application of mobile e-beam for green environment. W: *Radiation technology for cleaner products and processes* (s. 101-109). Vienna: IAEA. IAEA-TECDOC-1786.